



Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département Génie des Procédés et
Environnement



Mémoire de projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des
Procédés et Environnement

Modélisation d'outil de suivi des émissions énergétiques des gaz à effet de serre dans le secteur industriel

REZZAZ Khadidja

Présenté et soutenu publiquement le : 24/06/2025, devant le
jury composé par :

Président	M. NAMANE Abdelkader	Pr.ENP
Promoteur	M. SOLTANE Ramzi	CT.GIZ
Promotrice	Mme. TCHEKIKEN Chahinez	MCB.ENP
Examineur	M. KERCHICH Yacine	Pr.ENP

ENP 2025



Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département Génie des Procédés et
Environnement



Mémoire de projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des
Procédés et Environnement

Modélisation d'outil de suivi des émissions énergétiques des gaz à effet de serre dans le secteur industriel

REZZAZ Khadidja

Présenté et soutenu publiquement le : 24/06/2025, devant le
jury composé par :

Président	M. NAMANE Abdelkader	Pr.ENP
Promoteur	M. SOLTANE Ramzi	CT.GIZ
Promotrice	Mme. TCHEKIKEN Chahinez	MCB.ENP
Examineur	M. KERCHICH Yacine	Pr.ENP

ENP 2025

يتناول هذا البحث تحليلاً مفصلاً للديناميكيات المناخية العالمية، والالتزامات الدولية، والوضع الوطني لقطاع الصناعة. كما يعرض منهجية دقيقة لبناء نموذج طاقي يعتمد على بيانات الاستهلاك، وعوامل الانبعاث، وسيناريوهات التطور. تم دراسة نوعين من السيناريوهات: سيناريو مرجعي، وسيناريو للتخفيف من الانبعاثات. وتسمح النتائج المحصلة بتقييم تأثير الاستراتيجيات المختلفة على تقليص الانبعاثات، ومقارنة المسارات الطاقوية، واقتراح توصيات من أجل سياسة صناعية مستدامة ومنسجمة مع الأهداف المناخية.

كلمات مفتاحية : التغير المناخي, الصناعة, النمذجة, أداة LEAP .

Abstract

The study provides a comprehensive analysis of global climate dynamics, international commitments, and the national context of the industrial sector. It also presents a methodological approach to develop an energy model based on consumption data, emission factors, and development scenarios. Two types of scenarios are explored: a baseline scenario, and a mitigation scenario. The results allow us to assess the impact of various strategies on emissions reduction, compare energy trajectories, and propose recommendations for a sustainable industrial policy aligned with climate objectives.

Keywords : Climate change, industry, modeling, LEAP tool.

Résumé

L'étude s'articule autour d'une analyse détaillée des dynamiques climatiques mondiales, des engagements internationaux, et de la situation nationale du secteur industriel. Il présente également une approche méthodologique rigoureuse pour construire un modèle énergétique basé sur les données de consommation, les facteurs d'émission et les scénarios de développement. Deux types de scénarios sont étudiés : un scénario de référence, et un scénario de transition énergétique. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'impact de diverses stratégies sur la réduction des émissions, de comparer les trajectoires énergétiques, et de proposer des recommandations pour une politique industrielle durable et alignée sur les objectifs climatiques.

Mots clés : Changement climatique, industrie, modélisation, outil LEAP.

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Je remercie tout d'abord, M. Ramzi SOLTANE et l'équipe Atténuation ainsi que toute l'équipe du projet ClimGov 2 "Appui à la mise en oeuvre de l'accord de Paris en Algérie" GIZ pour leur accueil chaleureux, leur encadrement, et les moyens mis à ma disposition durant mon stage. Leur professionnalisme et leur bienveillance ont largement enrichi mon expérience.

Mes remerciements vont également à mon encadrante à l'école nationale polytechnique Mme. Chahinez TCHEKIKEN, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, et son accompagnement tout au long de ce travail. Son expertise et son soutien ont été essentiels à l'aboutissement de ce projet.

Je remercie aussi mes enseignants, collègues, amis et membres de ma famille pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de mon parcours.

Enfin, une pensée toute particulière à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien permanent, sans lesquels rien n'aurait été possible.

Mes chaleureux remerciements au président et aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce projet.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations et acronymes

Introduction Générale **13**

1 Les changements climatiques, approches de modélisation et outils de simulation	15
1.1 Introduction	16
1.2 Les changements climatiques	16
1.2.1 Crise climatique mondiale	16
1.2.2 L'effet de serre	17
1.2.3 Les émissions des gaz à effet de serre	19
1.2.4 Impacts du changement climatique	20
1.2.5 Lutte contre le changement climatique	21
1.2.6 Situation mondiale	22
1.2.7 Enjeux de la transition énergétique	26
1.2.8 Le secteur de l'industrie et les émissions de GES, au niveau national et international	30
1.3 Approches de modélisation et outils de simulation	41
1.3.1 Le role de la modélisation	41
1.3.2 Critères de calcul des émissions des GES	41
1.3.3 Les outils de modélisation (simulation et optimisation)	43
1.3.4 Eléments méthodologiques pour la modélisation	48
1.3.5 Logiciel retenu : Low Emissions Alternative Platform (LEAP) . . .	49

1.4	Conclusion	51
2	Modélisation des émissions énergétiques des gaz à effet de serre du secteur de l'industrie	52
2.1	Introduction	53
2.2	Interfaces du LEAP	53
2.2.1	Vue d'analyse	54
2.2.2	Affichage des résultats	54
2.2.3	Arbre et arborescence	55
2.2.4	Bilans énergétiques	57
2.2.5	Diagramme de Sankey	57
2.3	Les scénarios étudiés	58
2.4	Les hypothèses du scénario de référence	65
2.5	Modélisation du scénario de référence	67
2.6	Les hypothèses du scénario d'atténuation	67
2.6.1	Sous-secteur lié aux activités énergétiques	68
2.6.2	Industrie sidérurgique	70
2.6.3	Industrie chimique	71
2.6.4	Industrie agroalimentaire	72
2.6.5	Industrie cimentière	74
2.7	L'établissement du scénario atténuation	75
2.8	Conclusion	76
3	Résultats, analyses et interprétation des scénarios	77
3.1	Introduction	78
3.2	Résultats des hypothèses du scénario de référence	78
3.3	Résultats des hypothèses du scénario de transition énergétique	81
3.4	Résultats de modélisation	83
3.4.1	Résultats de modélisation du scénario de référence	83
3.4.2	Résultats de modélisation du scénario de transition énergétique	90
3.4.3	Comparaison des scénarios de référence et de transition énergétique	96

3.4.4	Comparaison des scénarios de référence et transition énergétique pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques	97
3.4.5	Comparaison des scénarios de référence et de transition énergétique pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction . .	99
3.5	Conclusion	100
Conclusion et perspectives		101
Bibliographie		104

Liste des figures

1.1	Schéma bilan : L'effet de serre [5]	18
1.2	Carte de l'Irradiation Solaire Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)[13]	27
1.3	Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [13]	28
1.4	Répartition des émissions totales de GES (hors UTCATF) en 2021 à l'échelle mondiale [14]	30
1.5	Les émissions des GES par combustible à l'échelle mondiale [16]	31
1.6	Bouquet énergétique primaire dans le monde [16]	32
1.7	Les émissions de CO ₂ depuis 1750 par grande région du monde [18]	33
1.8	Les émissions nationales totales de GES (sans UTCATF) [17]	34
1.9	Les émissions nationales totales de GES par secteurs (sans UTCATF) [17]	36
1.10	La part des gaz dans les émissions nationales totales des GES (sans UTCATF) [17]	37
1.11	Les émissions totales nationales de CO ₂ (sans UTCATF) [17]	38
1.12	Les émissions totales nationales de CH ₄ (sans UTCATF) [17]	38
1.13	Les émissions totales nationales de N ₂ O (sans UTCATF) [17]	39
1.14	Evolution des émissions nationales de GES(avec UTCATF) [17]	39
1.15	Emissions totales de GES au niveau national (avec UTCATF) par secteur [17]	40
2.1	La vue d'analyse de LEAP [21]	54
2.2	Affichage des résultats sur LEAP [21]	55
2.3	Diagramme de Sankey [21]	58
2.4	La structure hiérarchique des sous secteurs sur LEAP	59
2.5	Document d'inventaire national	60
2.6	Etablissement du scénario de référence	67

2.7	Etablissement du scénario de transition énergétique	76
3.1	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux sous-secteurs pour le scénario de référence	83
3.2	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)	85
3.3	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)	87
3.4	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux sous-secteurs pour le scénario de transition énergétique	90
3.5	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)	91
3.6	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)	93
3.7	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios	96
3.8	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques	97
3.9	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction	99

Liste des tableaux

1.1	Paramètres clés des gaz à effet de serre [4]	24
1.2	Comparaison des émissions des GES dans quelques pays [4]	25
2.1	Les données d'activité par type de combustible dans le sous-secteur 1.A.2.a industrie sidérurgique en (TJ) issu du NID	63
2.2	Les facteurs d'émissions du secteur de l'industrie selon IPCC Tier 1 sur LEAP (TJ)	64
2.3	Les inputs de calcul des TCAM BAU de chaque type de combustible des sous-secteurs	66
3.1	Résultats de calcul des TCAM BAU par combustible et sous-secteur industriel	79
3.2	Résultat de calcul des TCAM Atténuation par combustible et sous-secteur industriel	81
3.3	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux sous-secteurs pour le scénario de référence	84
3.4	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)	85
3.5	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)	86
3.6	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)	86
3.7	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)	87
3.8	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par gaz dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)	88

3.9	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)	89
3.10	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux sous-secteurs pour le scénario de transition énergétique	90
3.11	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)	91
3.12	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)	92
3.13	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)	92
3.14	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)	94
3.15	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)	94
3.16	Les émissions des GES en MtCO ₂ eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)	95
3.17	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios	96
3.18	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques	97
3.19	Les émissions de GES en MtCO ₂ eq des deux scénarios pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction	99

Liste des abréviations et acronymes

BAU *Business As Usual*

BTR *Biennial Transparency Report*

CCNUCC *Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*

CDN *Contribution Déterminée Nationale*

CH₄ *Méthane*

CFC *Chlorofluorocarbures*

COP *Conférence des Parties*

CSC *Captage et Stockage du Carbone*

CSP *Concentrated Solar Power (Energie solaire concentrée)*

ENR *Energie Renouvelable*

Fours DRI *Direct Reduction Iron*

GES *Gaz à effet de serre*

GIEC *Groupe Intergouvernementale sur l'Evolution du Climat*

HFC *Hydrofluorocarbone*

IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LEAP *Low Emissions Analysis Platform*

LPG *Liquefied Petroleum Gas*

N₂O *Protoxyde d'azote*

NID *National Inventory Document (Document d'inventaire national)*

PRG *Potentiel de Réchauffement Climatique*

PV *photovoltaïque*

SEI *Stockholm Environment Institute*

SF₆ *Hexafluorure du soufre*

TCAM *Taux de Croissance Annuel Moyen*

UTCATF *Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie*

Unités

kWh *Kilos Watt Heures*

MW *MégaWatt*

TJ *TéraJoules*

TEP *Tonne Équivalent Pétrole*

Introduction Générale

Introduction Générale

Le changement climatique constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs auxquels est confrontée l'humanité. L'augmentation rapide des émissions de gaz à effet de serre (GES), principalement dues aux activités humaines, a provoqué des modifications profondes et durables dans le système climatique. Face à l'urgence climatique, la communauté internationale s'est mobilisée à travers divers accords et protocoles afin de limiter le réchauffement de la planète. Dans ce contexte mondial, l'Algérie, pays riche en ressources énergétiques, est également appelée à s'engager dans une trajectoire de développement durable.

Le secteur industriel, moteur essentiel de la croissance économique, est également l'un des principaux émetteurs de GES. L'identification précise des sources d'émissions et l'évaluation de leur impact environnemental sont devenues une priorité afin de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation efficaces.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous intéressons à la modélisation des émissions de GES dans le secteur industriel en Algérie, en s'appuyant sur l'outil LEAP (Low Emissions Analysis Platform). Ce dernier permet de simuler différents scénarios d'évolution du système énergétique national, d'estimer les émissions futures et d'évaluer l'impact de mesures de réduction.

L'objectif principal de ce travail est de modéliser à travers un modèle permettant de quantifier les émissions actuelles et projetées des GES dans le secteur industriel algérien, d'analyser les tendances d'émission et d'identifier les leviers d'action pour réduire l'empreinte carbone du secteur. Ce travail s'articule autour de plusieurs axes : une première partie dédiée aux changements climatiques et aux aspects de la modélisation, une seconde portant sur la modélisation des émissions spécifiques au secteur industriel, et une dernière consacrée à l'analyse et à l'interprétation des scénarios proposés.

Chapitre 1

Les changements climatiques,
approches de modélisation et outils
de simulation

1.1 Introduction

Depuis la sortie du cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5) en 2014, une multitude de modifications climatiques significatives ont eu lieu à l'échelle mondiale. Selon les estimations, de nombreux changements concomitants dans le système climatique physique se sont intensifiés, y compris la hausse des températures globales, la diminution du volume de glace, l'ascension du niveau marin et les modifications des schémas de précipitations à l'échelle mondiale. L'altération du système climatique, marquée par des phénomènes extrêmes plus puissants, a engendré des conséquences néfastes sur les systèmes naturels et humains à l'échelle mondiale.

Cela a contribué à la perte et à la dégradation des écosystèmes, notamment des récifs coralliens tropicaux ; à la réduction de la sécurité hydrique et alimentaire ; à l'augmentation des dommages aux infrastructures ; à la mortalité et à la morbidité supplémentaires ; aux migrations et aux déplacements humains ; à l'augmentation des problèmes de santé mentale ; et à l'aggravation des inégalités [1].

Ce chapitre fournit une vue globale des impacts observés et des risques prévus du changement climatique ainsi que la situation mondiale, les engagements internationaux sur le climat, les enjeux de la transition énergétique, le secteur industriel et les émissions de GES, au niveau national et international, de plus, les aspects et différents modèles de modélisation et simulation.

1.2 Les changements climatiques

1.2.1 Crise climatique mondiale

Les modifications climatiques se réfèrent aux altérations durables de la température et des schémas météorologiques. Cela peut inclure des variations naturelles, telles que celles causées par le cycle solaire ou par d'immenses éruptions volcaniques. Toutefois, depuis le 19ème siècle, c'est principalement l'activité humaine qui est responsable des modifications climatiques, essentiellement dû à la consommation de ressources fossiles

telles que le charbon, le pétrole et le gaz. L'utilisation de combustibles fossiles produit des émissions de gaz à effet de serre qui forment une sorte de couverture autour de la terre, capturant la chaleur solaire et provoquant un réchauffement global [2].

Les changements climatiques récents ont eu des effets négatifs à grande échelle sur les écosystèmes. L'émission continue de gaz à effet de serre entraînera un réchauffement supplémentaire et des changements durables dans toutes les composantes du système climatique, augmentant la probabilité d'impacts graves, généralisés et irréversibles sur divers systèmes humains et naturels. Par conséquent, l'évaluation de la vulnérabilité des écosystèmes dans le contexte du changement climatique mondial est l'un des principaux éléments de l'étude actuelle du changement global. Selon la définition du GIEC, la vulnérabilité au changement climatique est le degré auquel un système est susceptible, ou incapable de faire face aux effets néfastes du changement climatique, y compris la variabilité et les extrêmes climatiques. Elle est en fonction du caractère, de l'ampleur et du taux de variation climatique auquel un système est exposé (exposition), de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation [3].

1.2.2 L'effet de serre

La modification d'origine anthropique du climat de la terre est une évidence incontestable. Les actions humaines libèrent des gaz à effet de serre qui influencent l'absorption du rayonnement infrarouge émis par notre globe. Ce phénomène, identifié depuis le XIX^e siècle est dénommé forçage radiatif [4].

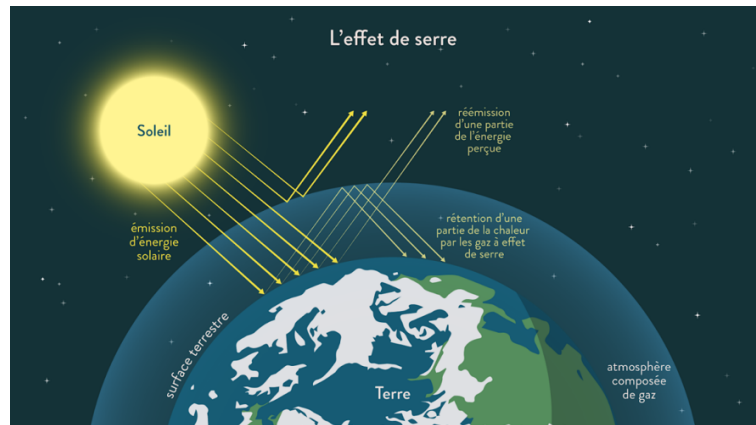


Figure 1.1: Schéma bilan : L'effet de serre [5]

L'évaluation de la teneur en dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre reflète les estimations des rejets, principalement liés à l'exploitation intensive des énergies fossiles depuis l'ère industrielle. Cela fait plus d'un million d'années que l'atmosphère terrestre n'a pas contenu autant de gaz à effet de serre. Actuellement, nous atteignons presque 400 ppm 36, au lieu des 280 ppm de la période préindustrielle qui servent de référence aux climatologues. Cette valeur connaît une hausse constante d'environ 2 ppm chaque année [4].

- L'effet cumul : C'est le surplus de CO_2 libérés dans l'atmosphère qui n'est pas immédiatement absorbée par les océans ou la végétation terrestre persiste à se dissiper, mais ce processus reste lent. Il est à noter qu'après un siècle, seulement la moitié de ce surplus a été éliminée. Ce phénomène justifie une accumulation des volumes de CO_2 [6].
- L'effet de l'inertie des océans : Les gaz à effet de serre diminuent l'évacuation de la chaleur provenant du soleil et entraînent une augmentation des températures à la surface de la planète qui se poursuit tant que l'augmentation associée du flux terrestre infrarouge vers l'espace n'a pas ramené le système terrestre à l'équilibre. Les couches superficielles des océans en interaction avec l'atmosphère comptent quelques dizaines de mètres d'épaisseur, selon la géographie et les saisons. Elles sont le principal lieu de stockage de cette chaleur et sont à l'origine d'une importante inertie thermique des océans [6].

1.2.3 Les émissions des gaz à effet de serre

On désigne sous le terme de gaz à effet de serre les molécules dont l'existence dans l'atmosphère peut influencer l'équilibre thermique terrestre. La vapeur d'eau, qui constitue la base des nuages, est l'une de ces molécules. Par ordre de pertinence, les autres molécules incluent le dioxyde de carbone, l'ozone, le méthane, le protoxyde d'azote, les fluorocarbures et l'hexafluorure de soufre. La plupart des gaz à effet de serre proviennent de sources naturelles [4].

- Le dioxyde de carbone : Comme étant le principal contributeur à l'amplification de l'effet de serre, on exprime la capacité de réchauffement des autres molécules en termes d'équivalent CO_2 . Les activités humaines, comme le défrichement des forêts et la combustion de combustibles fossiles, émettent d'importantes quantités de CO_2 dans l'atmosphère. [4] Il est responsable d'environ 65 % de l'effet de serre anthropique.
- Le méthane CH_4 : C'est l'hydrocarbure le plus simple de la catégorie des alcanes, il est responsable de 17 % de l'effet de serre anthropique du fait de son potentiel de réchauffement global élevé, égal à 34 fois celui du CO_2 à cent ans, mais qui persiste moins de dix ans dans l'atmosphère [7].
- Les chlorofluorocarbures (CFC) : Ont été bannis en 1987 à cause de leur rôle dans la destruction de la couche d'ozone. Ils ont été remplacés par les gaz Hydrofluorocarbures (HFC) non chlorés pour les mousses, bombes aérosols ou autres fluides de réfrigération. Quant à l'hexafluorure de soufre, il était utilisé comme isolant dans les transformateurs [4].
- La vapeur d'eau : Provient de l'évaporation des mers, le gaz carbonique de la respiration animale et végétale, le méthane de la fermentation des matières organiques et le protoxyde d'azote des sols et des océans [4].
- Le protoxyde d'azote N_2O : Le protoxyde d'azote est un gaz issu au départ de sources naturelles, en particulier des sols et des océans terrestres. Cependant, plusieurs activités humaines se sont mises à en produire des quantités phénoménales depuis

le XXème siècle, ce qui a conduit à la hausse progressive et conséquente de sa concentration dans l’atmosphère [8]. L’industrie chimique est la seconde source par ordre d’importance (5 % des émissions), car le protoxyde d’azote est utilisé dans le cadre de la fabrication de plusieurs acides (nitrique et adipique), du glyoxal et de certains équipements de la vie courante [8].

1.2.4 Impacts du changement climatique

Le changement climatique ne se limite pas uniquement à une hausse des températures. Il s’agit d’un phénomène global qui entraîne des modifications profondes sur l’ensemble du système terrestre. Comme la terre fonctionne comme un système interconnecté, une variation dans un lieu donné peut entraîner des répercussions dans d’autres régions du monde [9].

- **Augmentation des températures** : La hausse de température influence plusieurs phénomènes environnementaux, engendrant des impacts en cascade sur les écosystèmes et les sociétés humaines [9].
- **Sécheresse** : réduction des ressources en eau, impact sur l’agriculture et l’approvisionnement en eau potable.
- **Manque d’eau** : affecte les populations humaines, la biodiversité et les industries dépendantes des ressources hydriques [9].
- **Incendies dévastateurs** : augmentation de la fréquence et de l’intensité des incendies de forêt en raison de conditions plus sèches et plus chaudes.
- **Diminution de la biodiversité** : déséquilibres écologiques entraînant des extinctions d’espèces et des perturbations dans les chaînes alimentaires.
- **Fonte des glaces arctiques** : accélération de la disparition des glaciers, menaçant la faune locale et contribuant à la montée des océans [9].
- **Pollution de l’air et impact sur la santé humaine** : En 2021, la pollution de l’air a été responsable de 8,1 millions de décès à travers le monde, devenant ainsi le

deuxième facteur de risque de mortalité. De plus, les enfants de moins de cinq ans figurent parmi les populations les plus vulnérables. Près de 90 % des décès liés à la pollution de l'air et les régions les plus touchées sont l'Asie du Sud et l'Afrique, où l'exposition aux polluants atmosphériques est particulièrement élevée [9].

- **Impact sur la mortalité infantile** : En 2021, plus de 700 000 décès d'enfants de moins de cinq ans étaient liés à la pollution de l'air. Ces décès représentaient 15 % de la mortalité infantile mondiale [9].

1.2.5 Lutte contre le changement climatique

La lutte contre le réchauffement climatique reste une préoccupation majeure et les actions requises pour en minimiser l'impact font l'objet d'engagements à l'échelle internationale (protocole de Kyoto et ses suites) [10].

Les engagements internationaux

- **La CCNUCC** : En 1992, le Comité intergouvernemental de négociation de l'ONU a convenu d'un texte créant la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), un traité environnemental. Les représentants gouvernementaux de plusieurs pays se sont réunis à Rio de Janeiro, au Brésil, pour signer le traité. Les signataires ont convenu de travailler à maintenir les gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui ne modifierait pas le climat de la Terre. Mais le traité ne comprenait pas de détails, comme des objectifs spécifiques. Il s'agissait simplement d'un accord formel d'intention [10]. L'Algérie l'a ratifié le 14 juin 1993 .
- **Le protocole de KYOTO 1997** : Quelques années après la création de la CCNUCC, le Protocole de Kyoto est apparu comme le premier ajout à la CCNUCC à Kyoto, au Japon, en décembre 1997 [10]. L'objectif du traité était de réduire la quantité de gaz à l'origine du changement climatique. L'effort s'est concentré sur six gaz à effet de serre. Le principal gaz sur lequel le traité se concentrait était le dioxyde de carbone [10]. L'Algérie l'a ratifié le 12 juin 2005 .

- **L'accord de Paris 2015** : Le 12 décembre 2015, Le traité qui en a résulté est connu sous le nom d'Accord de Paris a plusieurs objectifs. L'un d'eux est de limiter le réchauffement de la Terre à 2 °C 1,5 °C si possible. En outre, les délégués ont décidé que les pays riches doivent fournir un minimum de 100 milliards de dollars entre 2020 et 2025 pour soutenir 12 pays en développement. Les pays développés doivent également être les chefs de file en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre et sont chargés d'améliorer leurs efforts pour réduire ces gaz. L'accord vise également à faire en sorte que les émissions de gaz à effet de serre atteignent leur pic le plus rapidement possible [10]. L'Algérie l'a ratifié le 20 octobre 2016.
- **La COP** : La Conférence des parties est l'organe suprême de la CCNUCC. Depuis la conférence de Berlin COP1 en 1995, elle se réunit chaque année lors d'un sommet mondial, dans une ville différente, où sont prises des décisions pour respecter les objectifs de lutte contre le changement climatique. Les décisions ne peuvent être prises qu'à l'unanimité des parties. L'Algérie participe activement aux COP depuis l'entrée en vigueur de la CCNUCC (1994). Elle était présente dès la COP1 à Berlin en 1995, et continue de participer régulièrement.
- **Le Fond Vert Climat** : Mis en place en 2010 par les Nations Unies, il est destiné à financer des programmes de réduction des émissions des gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique dans les pays en développement.

1.2.6 Situation mondiale

Les actions humaines, notamment à travers les émissions de gaz à effet de serre, ont déclenché le réchauffement climatique.

La température de la surface terrestre a augmenté de 1,1 °C par rapport à celle de 1850-1900 durant la période de 2011 à 2020. De 2010 à 2019, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont persisté à s'accroître, en raison des contributions historiques et présentes inégales découlant d'une exploitation non durable de l'énergie, des pratiques d'utilisation et de modification des terres, des habitudes de vie ainsi que des méthodes de consommation et production qui varient d'une région à l'autre, entre nations et au sein même des nations, ainsi qu'entre individus.

Le changement climatique d'origine humaine affecte déjà de nombreux extrêmes météorologiques et climatiques dans toutes les régions du monde [1].

Cela a conduit à des conséquences néfastes étendues sur la sécurité alimentaire et en eau, la santé humaine, les économies et la société, sans oublier les pertes et préjudices associés à l'environnement et aux individus. Les communautés vulnérables qui ont historiquement apporté la moindre contribution au changement climatique contemporain subissent des effets disproportionnés [1].

Les émissions dues à l'utilisation des énergies fossiles sont d'un ordre de grandeur inférieur aux émissions naturelles de la biosphère et de l'hydrosphère, estimées à 550 Gt/an [4].

On estime que les forêts peuvent absorber jusqu'à 9,5 Gt/an et que les océans dissolvent près de 8,1 Gt/an, alors que nos émissions de CO₂ dépassent les 30 Gt/an [4].

Le tableau suivant représente quelques propriétés des gaz à effet de serre en 2013, en mettant en évidence leur concentration atmosphérique, leur durée de séjour, leur pouvoir de réchauffement global (PRG) et leur forçage radiatif anthropique.

La vapeur d'eau a la plus grande concentration dans l'atmosphère suivi du CO₂ ;

Les fluorocarbures ont une durée de séjour la plus extrême ;

Le PRG est mesuré par rapport au CO₂ (valeur de référence = 1). Le CH₄ a un PRG de 24, ce qui signifie qu'une molécule de CH₄ retient 24 fois plus de chaleur qu'une molécule de CO₂ sur une période de 100 ans, le N₂O est encore plus puissant avec un PRG de 300, les gaz fluorés (HFC, PFC) et le SF₆ ont des PRG extrêmement élevés (jusqu'à 22 800 pour le SF₆), ce qui les rend très préoccupants malgré leur faible concentration ;

Le CO₂ a le plus grand impact de forçage anthropique avec 1,66 W/m², ce qui confirme son rôle dominant dans le réchauffement climatique.

Tableau 1.1: Paramètres clés des gaz à effet de serre [4]

Molécule	Formule	Concentration dans l'atmosphère (ppb)	Durée de séjour (ans)	Pouvoir de réchauffement (sur 100 ans)	Forçage radiatif (W/m ²)
Vapeur d'eau	H ₂ O	3 000 000	0,02	8	?
Dioxyde de carbone	CO ₂	396 000	50 à 200	1	1,66
Ozone	O ₃	3,4	0,008	ns	0,30
Méthane	CH ₄	1 774	4 à 12	24	0,48
Protoxyde d'azote	N ₂ O	319	114	300	0,16
Fluorocarbures	HFC, PFC	0,144	1 à 10 000	10 000	0,25
Hexafluorure de soufre	SF ₆	0,005	3 200	22 800	0,08

Les émissions liées à la production et la consommation d'énergie

Au cours des années précédentes, l'utilisation d'énergie à l'échelle mondiale a libéré plus de 34 milliards de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. C'est trois fois plus que la capacité de la terre de le supporter [4].

Il est toutefois essentiel de noter qu'il y a des disparités considérables entre les pays. En effet, non seulement le niveau de consommation d'énergie par personne varie en fonction du niveau de vie, mais les émissions de CO₂ peuvent également différer grandement en fonction des emplacements et des méthodes de production d'énergie, même pour une quantité identique d'énergie utilisée [4].

Considérons un pays développé tel que l'Allemagne, dont la consommation d'énergie primaire s'élevait à 306 Mtep et les émissions de CO₂ à 803 Mt [4].

Par comparaison, la France a consommé 243 Mtep d'énergie primaire en émettant seulement 375 Mt de CO₂. Ainsi, alors que le français moyen consomme peu ou prou la même quantité d'énergie que l'allemand moyen, il émet près de deux fois moins de gaz carbonique. La raison de cette différence notable est l'utilisation du nucléaire pour la génération d'électricité [4].

En effet, la France, avec la Suède, présente l'un des taux d'émissions de gaz à effet de serre les plus faibles parmi les pays développés. Compte tenu des défis liés au réchauffement

climatique, la priorité ne devrait pas être de réduire notre consommation d'énergie, mais plutôt de l'utiliser plus efficacement, sans produire de CO₂, en aspirant à un rapport (émissions/ énergie) inférieur [4].

Alors que la Chine présente un indice de 3,4 se rapprochant de celui du charbon pur, la France ne montre qu'un indice de 1,5. Un objectif de 1 pourrait être un but attribué réalisable à moyen terme, même à l'échelle mondiale. Cet objectif ambitieux mais raisonnable serait certainement mieux accepté par les pays que la stricte restriction de dépense énergétique, totalement hors de portée et synonyme de décroissance [4].

Le tableau suivant présente trois indicateurs clés de la consommation énergétique et des émissions de CO₂ pour plusieurs régions du monde : Consommation énergétique, Émissions de CO₂ et Ratio émissions/consommation énergétique.

Les États-Unis ont la consommation énergétique par habitant la plus élevée (7,1 tep/an/hab), ainsi que les émissions de CO₂, ce qui reflète un mode de vie très énergivore avec une forte dépendance aux combustibles fossiles en comparaison avec les pays européens qui ont fait des efforts en faveur des énergies renouvelables, suivi par la Chine et l'Inde qui ont des émissions relativement faibles par habitant (6,7 et 1,5 tCO₂/hab/an), mais leur dépendance au charbon les rend très polluantes en termes de ratio.

Tableau 1.2: Comparaison des émissions des GES dans quelques pays [4]

PAYS	Consommation énergétique (hors biomasse) (tep/an/hab)	Émissions de CO₂ (tonnes/an/hab)	Ratio (tCO ₂ /tep)
États-Unis	7,1	18,9	2,7
Allemagne	3,8	9,8	2,6
Europe	3,5	8,1	2,3
Chine	1,9	6,7	3,4
France	3,7	5,7	1,5
Inde	0,5	1,5	3,2
MONDE	1,8	4,9	2,8

1.2.7 Enjeux de la transition énergétique

Aujourd'hui, le concept de transition énergétique fait référence à la transformation progressive d'un système énergétique basé sur l'utilisation de ressources non renouvelables (comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel, l'uranium, etc.) vers un système qui intègre partiellement des énergies renouvelables (telles que solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et géothermique) et encourage des pratiques énergétiques plus économes et performantes [11].

Une grande portion du changement climatique découle de l'activité humaine, notamment des émissions de gaz à effet de serre générées par la consommation et la dispersion d'énergie. Les émissions en CO_2 a augmenté ces dernières années notamment à cause de la croissance économique. Or la transition vers une économie décarbonée est devenue une nécessité étant donné la gravité de l'enjeu climatique [12].

Energies renouvelables

Dans le but d'offrir des solutions durables et globales face aux enjeux environnementaux ainsi qu'aux questions de conservation des ressources énergétiques fossiles, l'Algérie a pris l'engagement de développer les énergies renouvelables. Ce projet ambitieux, est destiné à favoriser le développement des énergies renouvelables [10].

L'Algérie s'engage dans une nouvelle phase de développement énergétique durable. Le programme de mise à jour des énergies renouvelables vise à déployer une capacité d'énergie renouvelable avoisinant les 22 000 MW d'ici 2030 pour le marché national [13].

Potentiels des énergies renouvelables

- **Le potentiel solaire** : Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m^2 soit près de 3 KWh/ m^2 au nord et dépasse 5,6 KWh/m au Grand Sud [13].

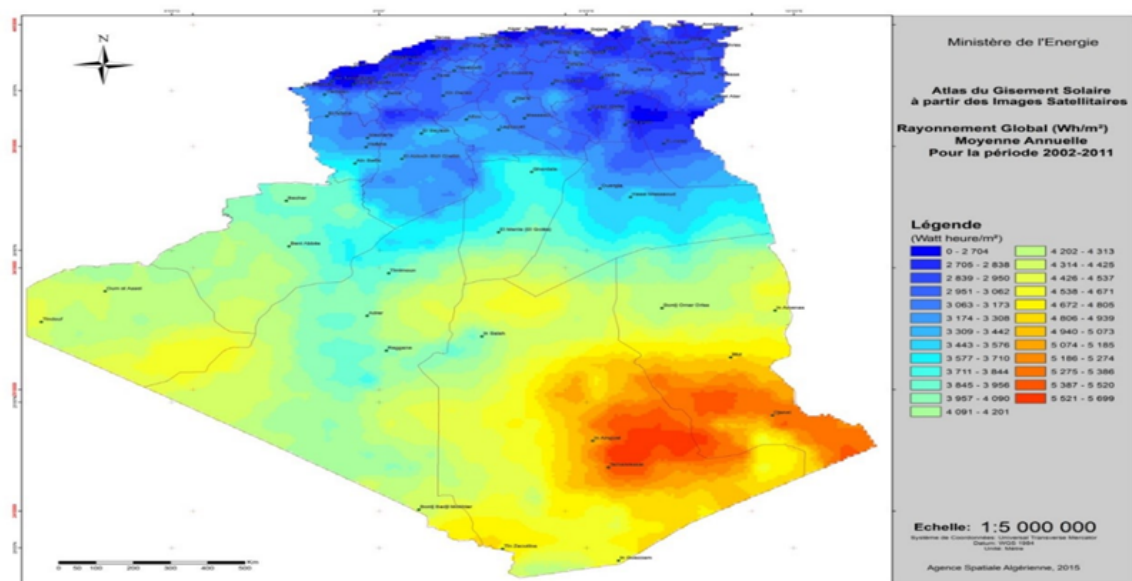


Figure 1.2: Carte de l'Irradiation Solaire Globale Directe Annuelle Moyenne (Période 2002-2011)[13]

- **Le potentiel éolien** : La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit

à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. La carte présentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset [13].

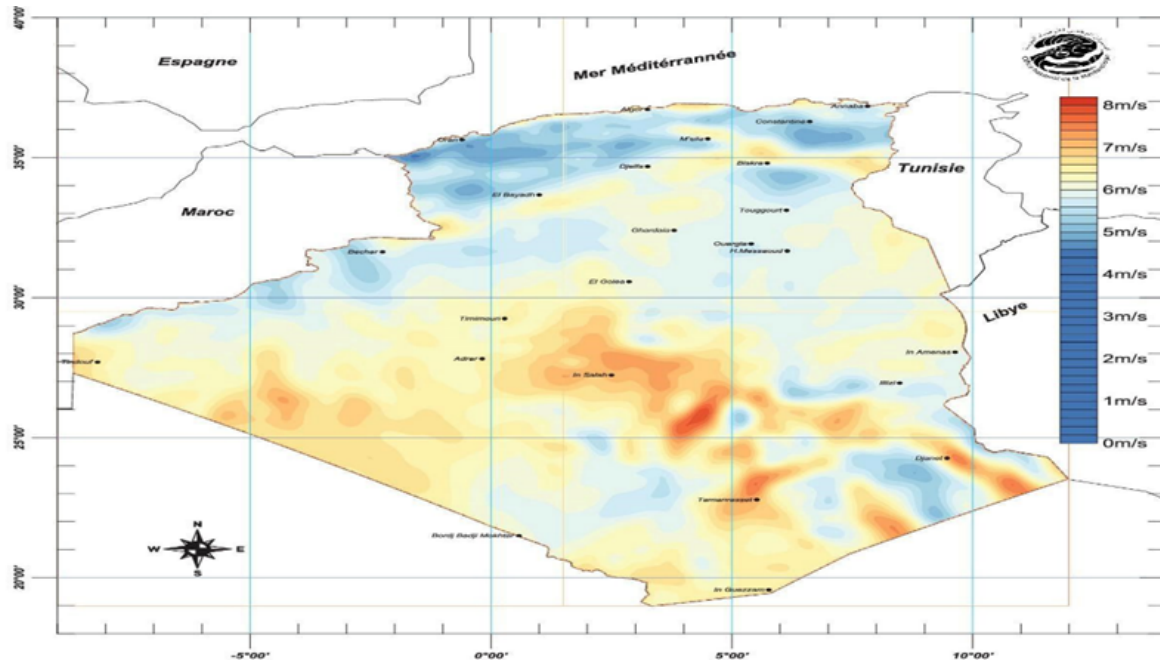


Figure 1.3: Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [13]

- **Le potentiel géothermique** : La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cents (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m [13].
 - Zone de Relizane et Mascara.
 - Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa.
 - Zone de Guelma et Djebel El Onk.
- **Le potentiel hydraulique** : Les volumes globaux de précipitations qui atteignent l'Algérie sont considérables, évalués à 65 milliards de m³. Toutefois, on observe une diminution des ressources de surface du nord vers le sud. On estime actuellement que les ressources utiles et renouvelables s'élèvent à environ 25 milliards de m³, dont

près des deux tiers proviennent de sources de surface. On a dénombré 103 sites de barrages. Actuellement, plus de 50 barrages sont en activité [13].

Efficacité énergétique

- **Programme nationale d'efficacité énergétique** : Le programme d'efficacité énergétique reflète l'engagement de l'Algérie à promouvoir une utilisation plus judicieuse de l'énergie et à examiner toutes les options pour protéger les ressources et assurer une consommation utile et optimale. Le but de l'efficacité énergétique est de générer les mêmes produits ou prestations, tout en consommant le minimum d'énergie possible. Ce programme inclut des mesures qui favorisent l'utilisation de types d'énergie les plus appropriés aux divers usages, exigeant une modification des habitudes et une amélioration des installations [13].
- **Plan d'action en matière d'efficacité énergétique** : Dans le contexte énergétique national, marqué par une hausse significative de la consommation alimentée en grande partie par le secteur résidentiel avec l'accroissement de nouveaux logements, le développement d'infrastructures publiques et la revitalisation de l'industrie, l'efficacité énergétique est appelée à jouer un rôle essentiel. La mise en œuvre de ce programme via une variété d'initiatives et de projets devrait, à long terme, stimuler la naissance d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie.

Pour le secteur de l'industrie : Le programme vise à amener les industriels à réduire leurs consommations énergétiques. En effet, l'industrie représente un enjeu pour la maîtrise de l'énergie du fait que sa consommation énergétique est appelée à s'accroître à la faveur de la relance de ce secteur. Pour ce secteur, c'est plus de 30 millions de TEP qui seront économisées [13].

1.2.8 Le secteur de l'industrie et les émissions de GES, au niveau national et international

Le secteur industriel est l'un des principaux émetteurs de gaz à effet de serre (GES), tant au niveau national (en Algérie) qu'international. Il contribue à la fois aux émissions directes (issues des procédés industriels et de la combustion d'énergies fossiles) et aux émissions indirectes (liées à l'utilisation d'électricité et de chaleur).

Les émissions industrielles à l'échelle internationale

En 2021, les activités humaines (hors UTCATF) ont généré des émissions de gaz à effet de serre équivalentes à 52,6 milliards de tonnes de CO₂, une hausse de 4,2% par rapport à 2020, principalement due à la reprise des activités post-pandémie Covid-19. Deux tiers de ces émissions sont attribuables au CO₂ d'origine fossile. Entre 1990 et 2021, les émissions mondiales ont augmenté de 58%, avec des variations notables en fonction des pays. La Chine émet plus de 25% du total, les États-Unis contribuent à 11% et l'Union européenne à 7%.

En %

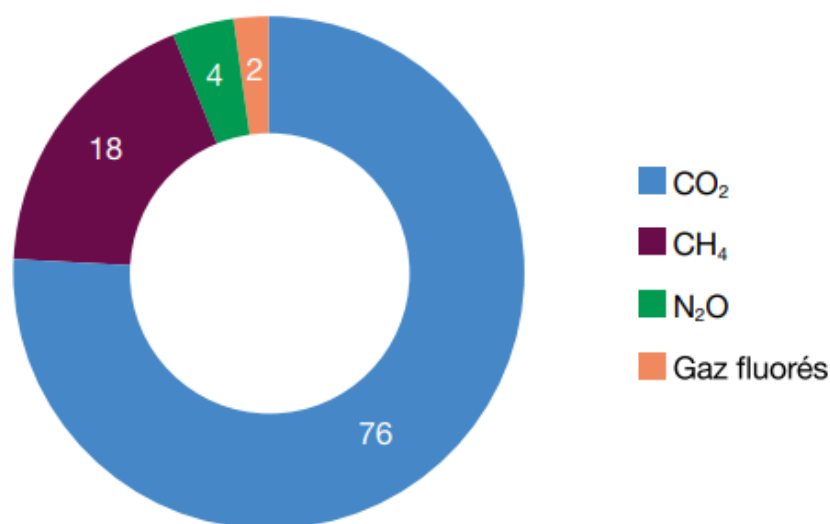


Figure 1.4: Répartition des émissions totales de GES (hors UTCATF) en 2021 à l'échelle mondiale [14]

Le potentiel de réchauffement global (PRG) permet de calculer, en tCO₂eq, l'impact des émissions de chaque gaz sur l'effet de serre [15]. En 2021, les émissions mondiales de gaz à effet de serre (hors UTCATF) atteignent 52,6 GtCO₂eq. Elles ont plus que doublé

depuis 1970 et augmenté de 58 % entre 1990 et 2021.

Le secteur UTCATF contribue positivement aux émissions de GES au niveau mondial. Ainsi, en 2020, les émissions de ce secteur étaient estimées à 5,8 GtCO₂eq [15]. En

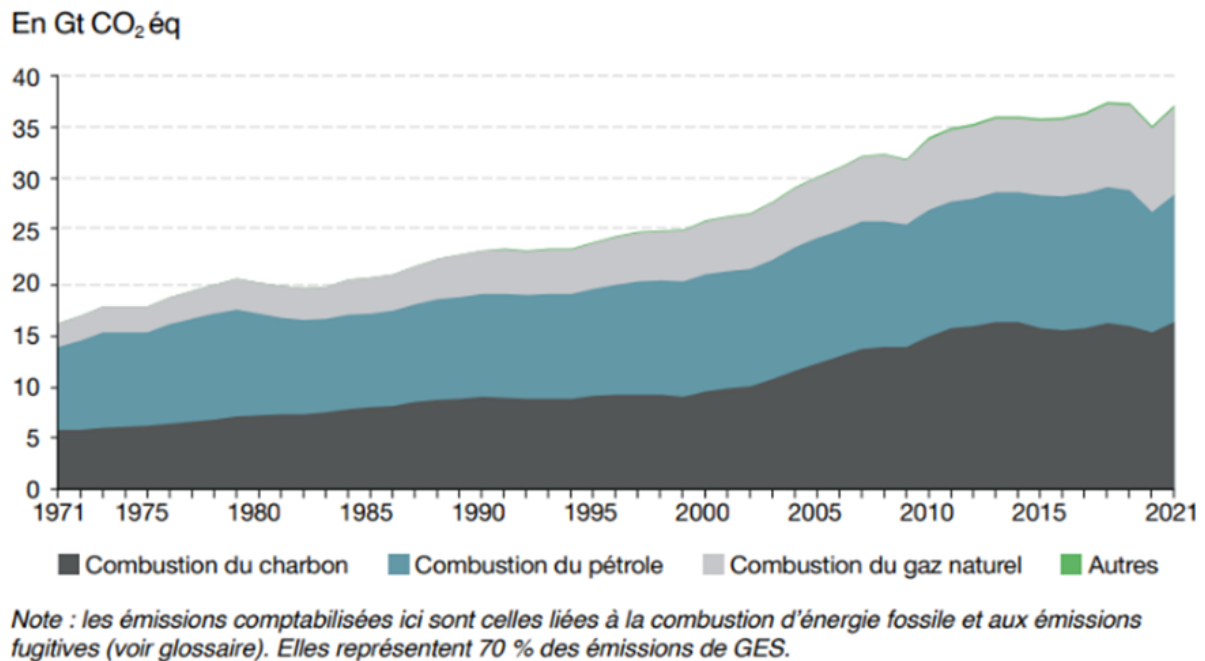


Figure 1.5: Les émissions des GES par combustible à l'échelle mondiale [16]

2021, l'activité économique reprend après le ralentissement provoqué par la pandémie. Les émissions de GES liées à la combustion d'énergie suivent en augmentant de 5,5 %, retrouvant quasiment leur niveau de 2019. Cette augmentation concerne tous les combustibles : + 6 % pour le charbon, + 5,5 % pour le pétrole, + 4,8 % pour le gaz naturel et + 1,2 % pour les autres combustibles [15]. La combustion de charbon génère 43 % des émissions mondiales, contre 33 % pour le pétrole et 23 % pour le gaz naturel. En 50 ans, les émissions mondiales de GES liées à la combustion d'énergie ont été multipliées par 2,3 [15].

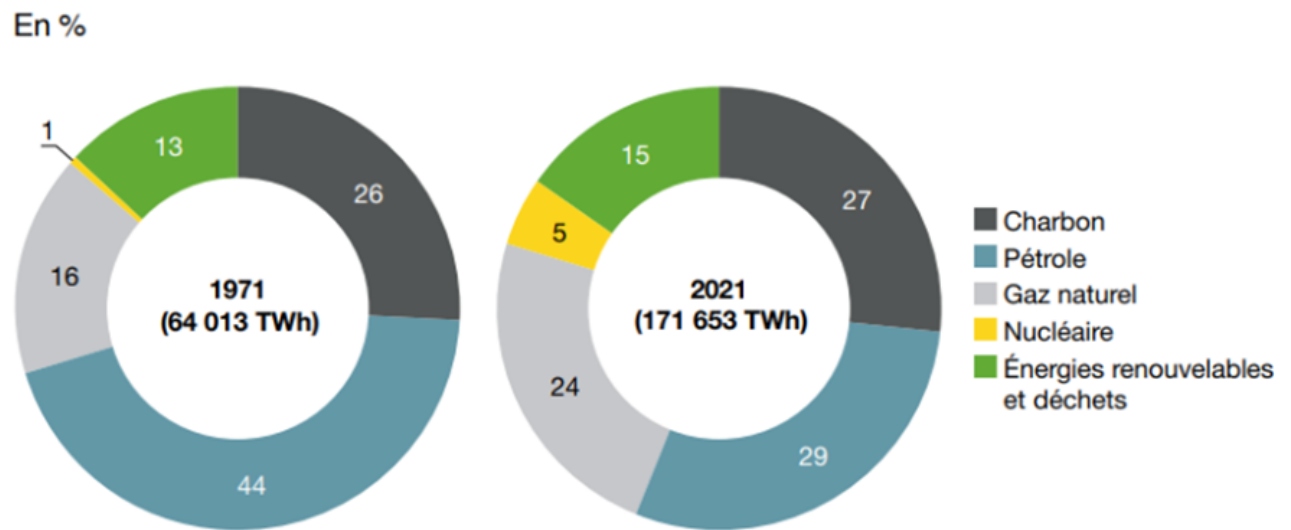
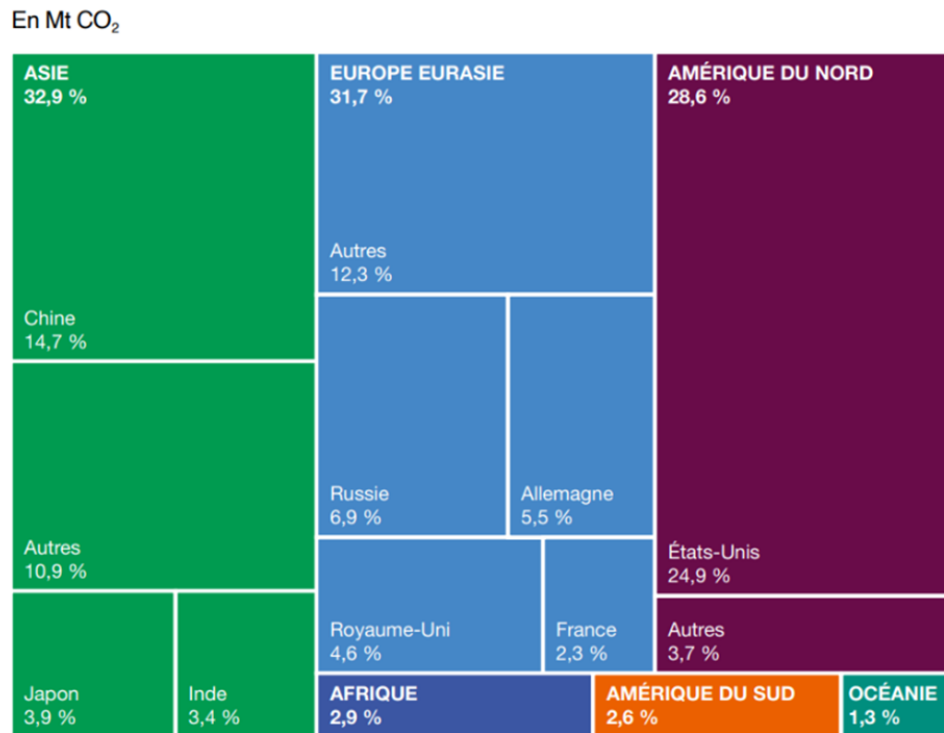


Figure 1.6: Bouquet énergétique primaire dans le monde [16]

Les émissions relatives à l'énergie sont influencées par la quantité d'énergie consommée (qui a augmenté de 168 % entre 1971 et 2021) et par le type de mix énergétique primaire, qui, sur la scène mondiale, demeure dominé par les énergies fossiles en 2021 (pétrole, charbon et gaz naturel : ces trois sources combinées représentent 80 % du total). Le pétrole reste la principale source d'énergie à l'échelle mondiale, surtout au profit du gaz naturel et de l'énergie nucléaire [15]. Cependant, le charbon demeure la principale source d'émissions. En effet, son facteur d'émission est largement plus élevé que ceux du gaz naturel et du pétrole, avec 4,0 tonnes de CO₂ par tep [15].



Note : émissions issues de la combustion du carbone fossile (hors UTCATF et transport international) de 1750 à 2021.

Figure 1.7: Les émissions de CO₂ depuis 1750 par grande région du monde [18]

Depuis le début de l'ère industrielle, l'Europe et l'Eurasie ont contribué pour un tiers et les États-Unis pour un quart aux émissions cumulées de CO₂. Celles de l'Asie atteignent désormais quasiment le tiers des émissions mondiales, et celles de la Chine 15 % [15].

Les émissions industrielles à l'échelle nationale

- **Émissions de GES (sans UTCATF)** : Les émissions totales de gaz à effet de serre (GES) de l'Algérie (sans l'UTCATF) (sans Utilisation des Terres, du Changement d'Affectation des terres et de la Foresterie) ont été estimées à :
 - 80,7 MtCO₂eq en 1990;
 - 172,5 MtCO₂eq en 2010;
 - 240,4 MtCO₂eq en 2022.

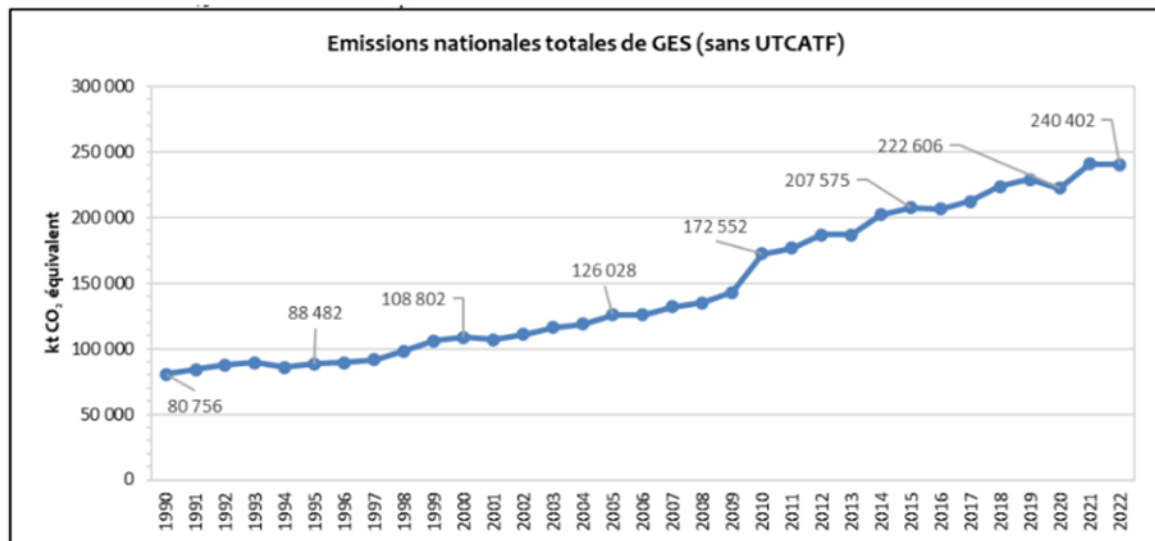


Figure 1.8: Les émissions nationales totales de GES (sans UTCATF) [17]

Les émissions nationales totales de GES sans UTCAF ont ainsi augmenté de 39,3 % entre 2010 et 2022 et ont diminué de 0,3 % au cours de la période 2021-2022 [17].

GIEC (Groupe Intergouvernementale sur l'Evolution du Climat)

Le GIEC est un organisme scientifique international créé en 1988 par deux institutions de l'ONU :

- L'Organisation météorologique mondiale (OMM)
- Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE)

Sa mission se constitue dans l'évaluation de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur le changement climatique, ses causes, ses impacts et les solutions possibles (atténuation, adaptation).

Il est important de noter que les émissions de gaz à effet de serre (GES) en Algérie sont catégorisées conformément aux classifications établies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement climatique (GIEC). Ces catégories facilitent l'identification des principales sources d'émissions et l'organisation des inventaires à l'échelle nationale :

1. Énergie (Catégorie 1 du GIEC) :

- Combustion de combustibles (1.A) : Inclut
 - * Industrie énergétique (1A1)
 - * l'industrie manufacturière (1A2)
 - * les transports (1A3),
 - * le secteur résidentiel (1A4).
- Émissions fugitives (1.B) : Émissions non intentionnelles lors de l'extraction, du traitement et du transport des combustibles fossiles, notamment le pétrole et le gaz naturel.

2. Procédés industriels et utilisation de produits (Catégorie 2 du GIEC) :

- Industries minérales (2.A) : Par exemple, la production de ciment.
- Industries chimiques (2.B) : Telles que la production d'acide nitrique.
- Utilisation de produits contenant des hydrocarbures fluorés (2.F) : Utilisation de gaz fluorés dans les équipements de réfrigération et de climatisation.
- **Tendances des secteurs pour la période 1990 - 2022** : Ce qui nous intéresse est la catégorie A (émissions directes) du GIEC, cependant, l'augmentation des émissions totales de GES entre 1990 et 2022 est principalement due à l'augmentation des émissions de GES du secteur Énergie du GIEC, qui sont passées de 62,9 MtCO₂eq en 1990 à 198,6 MtCO₂eq en 2022, soit une augmentation de 215,7 %. Les principales raisons de l'augmentation des émissions de GES dans le secteur 1 de l'énergie du GIEC sont les émissions provenant de :
 - * La catégorie 1.A.1 du GIEC : industries énergétiques (y compris, par exemple, la production d'électricité et la combustion de carburants dans les raffineries), qui ont plus que doublé ;
 - * La catégorie 1.A.3 du GIEC : comprend, par exemple, l'aviation nationale et le transport routier, qui a presque triplé.
 - * Catégorie 1.B du GIEC : Émissions fugitives (y compris, par exemple, les activités d'exploration, de production, de transmission et de distribution

du pétrole et du gaz), qui ont augmenté de 83,5 % par rapport à 1990.

[17]

Ces tendances s'expliquent par l'augmentation de la demande nationale d'énergie par les différents secteurs. En effet, le secteur résidentiel et autres est le premier consommateur d'énergie, avec plus de 36 % de la consommation finale d'énergie, suivi par le secteur des transports, qui représente environ 29 % de la consommation finale d'énergie et le secteur industriel et BTP qui représente actuellement près de 24 % de la consommation nationale d'énergie [17].

Les émissions provenant des processus industriels et de l'utilisation des produits (IPPU) s'élevaient à 6,7 millions de tonnes de CO₂ équivalentes en 1990 et à 22 millions de tonnes en 2022, représentant respectivement 8,3 % et 9,2 % du total des émissions de gaz à effet de serre en Algérie. Entre 1990 et 2022, les émissions de gaz à effet de serre provenant de l'IPPU ont connu une hausse de 229,7 %. Les activités de l'industrie minérale du GIEC, en particulier celles liées à la **catégorie 2.A (comme l'industrie du ciment)**, ainsi que celles relatives à la **catégorie 2.B (l'industrie chimique)**, incluant par exemple la production d'ammoniac et les processus connexes constituent les principales sources d'émissions [17].

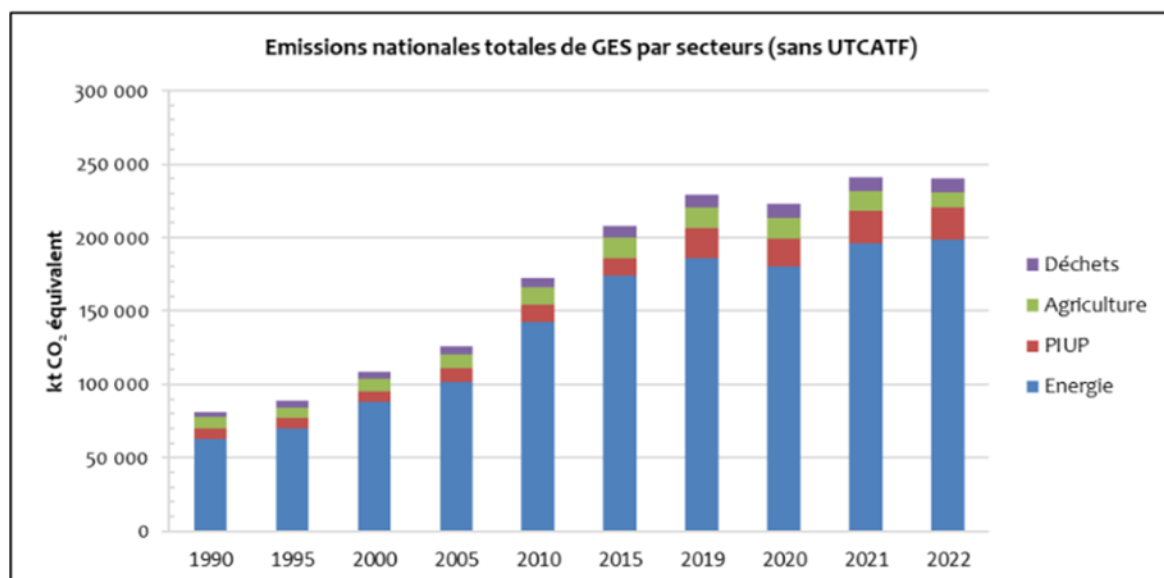


Figure 1.9: Les émissions nationales totales de GES par secteurs (sans UTCATF) [17]

Le secteur 3 Agriculture du GIEC représente la troisième source d'émissions

de GES au niveau national, avec des émissions qui ont augmenté de 22,0 %, passant de 7,8 MtCO₂eq à 9,5 MtCO₂eq au cours de la période 1990 à 2022 [17].

Les émissions de CH₄ provenant de **la catégorie 3.A (Fermentation entérique)** a augmenté de 16,2 %, passant de 5,3 MtCO₂eq en 1990 à 6,2 MtCO₂eq en 2022.

Le secteur 4 UTCATF a été un puits important au niveau national avec des absorptions nettes évaluées à - 11,4 MtCO₂eq en 2022 [17]. Le puits a augmenté de 32,2 % au cours de la période 1990-2022.

Le secteur 5 du GIEC déchets En 2022, cela représentait une source d'émissions nettement plus élevée que celle du secteur agricole. Au cours de la période 1990-2022, les émissions de ce secteur ont connu une croissance triplée, augmentant de 3,2 MtCO₂eq en 1990 pour atteindre 10 MtCO₂eq en 2022. Cela représente environ 4,2% du total des émissions de gaz à effet de serre en Algérie pour l'année 2022 [17].

– **Parts des gaz dans l'inventaire des GES de l'Algérie pour la période 1990-2022** : Les figures suivantes présentent la part de chaque gaz dans le total national des émissions de GES (sans l'UTCATF).

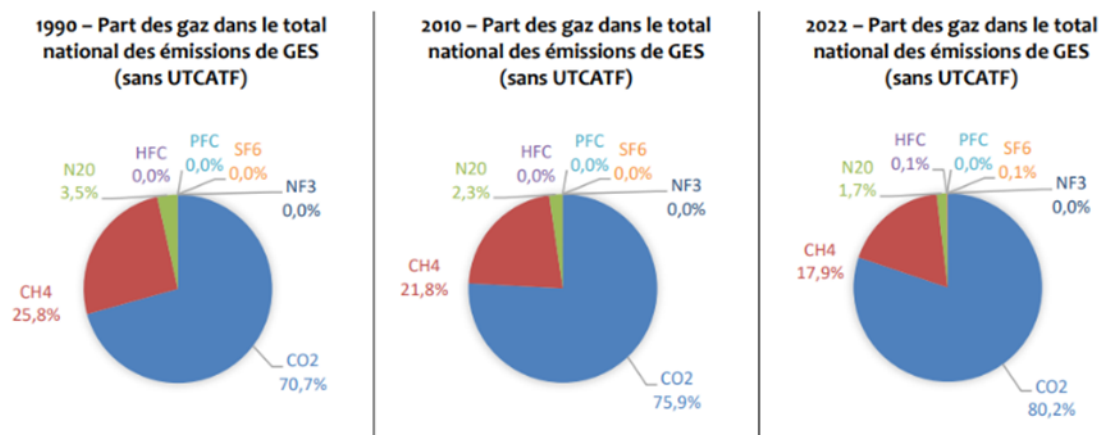


Figure 1.10: La part des gaz dans les émissions nationales totales des GES (sans UTCATF) [17]

En 2022, le dioxyde de carbone (CO₂) représentait 80,2% des émissions totales selon l'inventaire des GES de l'Algérie (sans l'UTCATF). Les émissions de CO₂ résultent principalement des activités de combustion, soit dans la catégorie 1.A du GIEC, Combustion de combustibles, soit comme résultat du torchage du méthane (CH₄) dans la catégorie 1.B du GIEC, émissions fugitives [17].

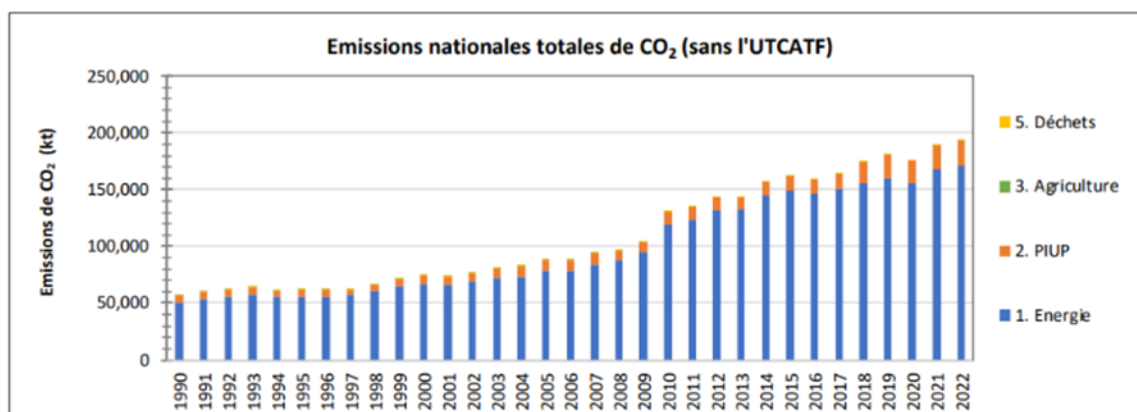


Figure 1.11: Les émissions nationales totales de CO₂ (sans UTCATF) [17]

Le méthane (CH₄) représente 17,9 % du total des émissions de gaz à effet de serre au niveau national. En Algérie, le méthane (CH₄) est principalement issu de **la catégorie IPCC 1.B** « Émissions fugitives », de **la catégorie IPCC 3.A** « Fermentation entérique » et de **la catégorie IPCC 5.A** « Élimination des déchets » [17].

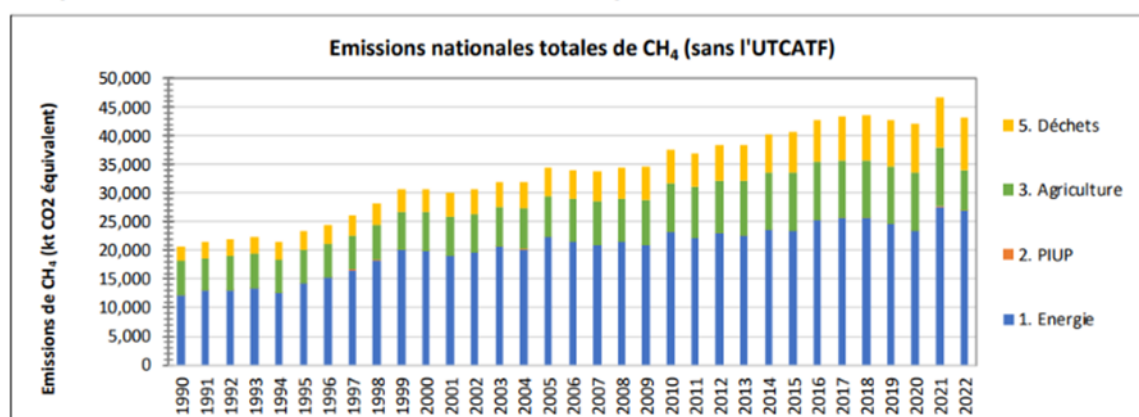


Figure 1.12: Les émissions nationales totales de CH₄ (sans UTCATF) [17]

L'oxyde nitreux (N₂O) représente 1,7 % des émissions globales de gaz à effet de serre du pays. En Algérie, les principales sources d'émission de N₂O sont les industries chimiques classées dans **la catégorie 2.B du GIEC** (qui produisent de l'acide nitrique) ainsi que les sols agricoles de **la catégorie 3.D du GIEC** [17].

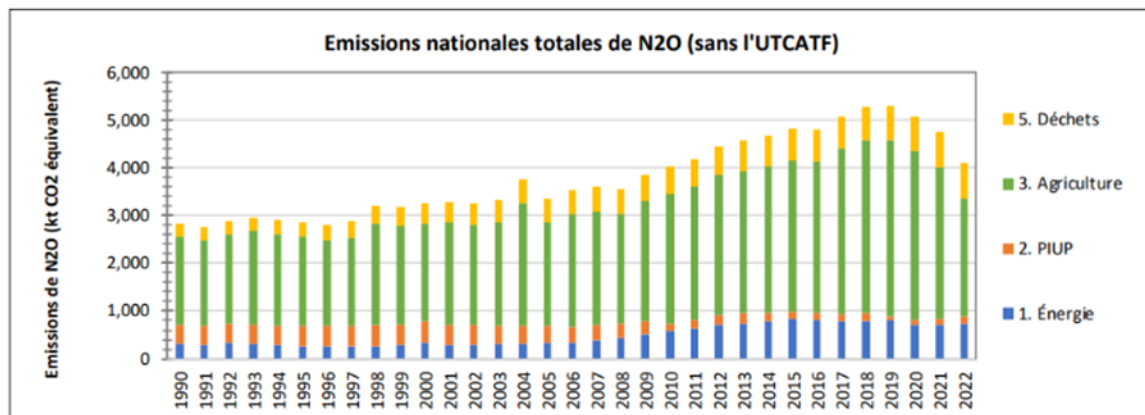


Figure 1.13: Les émissions totales nationales de N₂O (sans UTCATF) [17]

– **Émissions de GES (avec UTCATF)** : Les émissions totales de gaz à effet de serre (GES) de l'Algérie (avec UTCATF) ont été estimées :

- * à 72,1 MtCO₂eq en 1990;
- * à 162,4 72 MtCO₂eq en 2010;
- * à 228,9 MtCO₂eq en 2022.

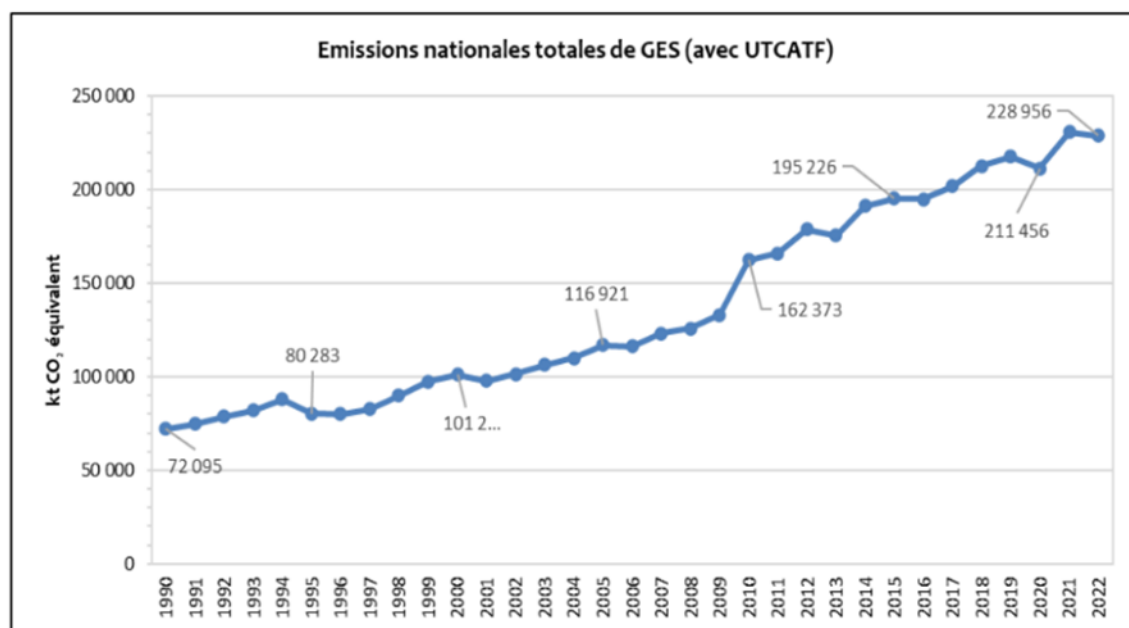


Figure 1.14: Evolution des émissions nationales de GES(avec UTCATF) [17]

Le dioxyde de carbone (CO₂) représente la plus grande proportion des émissions totales en 2022, atteignant 79,2%, avec l'UTCATF. Les activités de combustion sont la principale source des émissions de CO₂, incluant la **catégorie 1.A du GIEC** qui porte sur la Combustion de combustibles ainsi que la **catégorie 1.B du GIEC** concernant les Émissions fugitives [17].

Entre 1990 et 2022, les absorptions nettes de l'UTCATF ont enregistré une hausse de 32,2%, principalement grâce à la préservation des forêts existantes, le reboisement, mais également en raison d'une réduction des produits forestiers récoltés (comme le bois commercial et le bois de chauffage). Cependant, les feux de forêt annuels ont considérablement diminué les récoltes nettes. En 2022, le secteur UTCATF a joué un rôle important à l'échelle nationale en affichant des absorptions nettes de -11,4 MtCO₂eq. Durant la période 1990-2022, le puits a connu une hausse de 32 %, atteignant -8,6 MtCO₂eq. Hormis l'année 1994, où le secteur 4 UTCATF représentait en fait une source d'émissions de GES.

Les émissions de CH₄ et N₂O provenant du secteur UTCFAF résultent des incendies de forêt [17].

La figure suivante présente les émissions de gaz à effet de serre de l'Algérie par secteur pour la période 1990 - 2022 [18]:

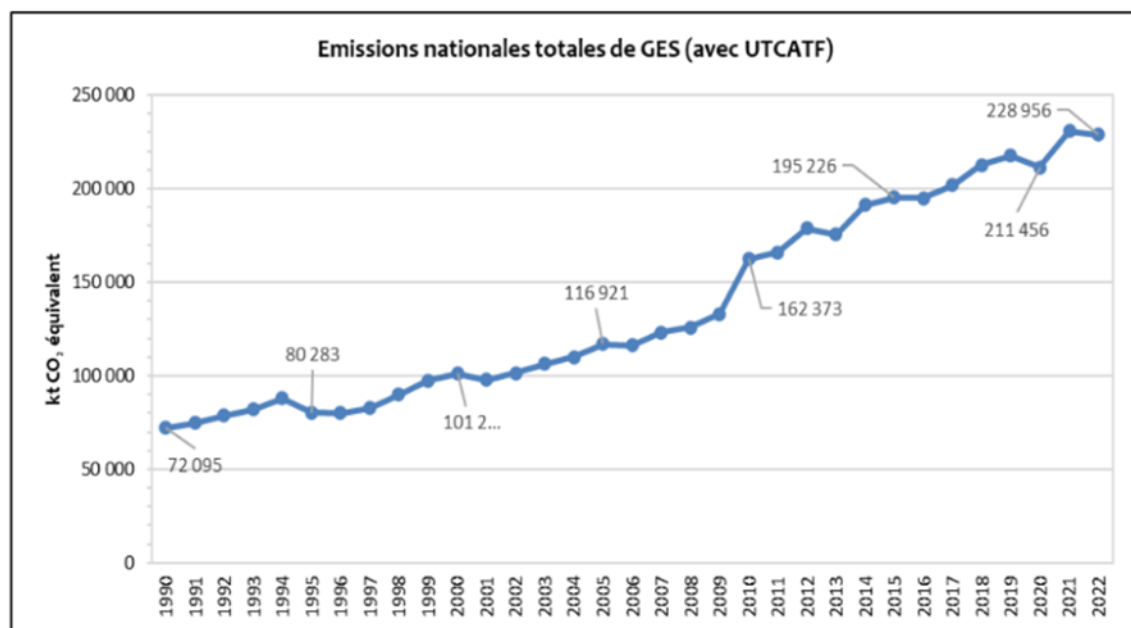


Figure 1.15: Emissions totales de GES au niveau national (avec UTCATF) par secteur [17]

1.3 Approches de modélisation et outils de simulation

1.3.1 Le role de la modélisation

La méthodologie de modélisation permet de comprendre la dynamique globale du système en se basant sur les principes des bilans énergétiques, tout en étant également capable d'examiner et de mesurer les tendances par secteur et par type d'énergie. En effet, la classification des consommations varie considérablement d'un secteur à l'autre. A titre d'exemple, les consommations des ménages concernent l'électricité, les produits pétroliers et le gaz naturel. Même s'il semble trivial de le rappeler, l'énergie n'est qu'un vecteur pour la satisfaction des besoins énergétiques des populations et des activités économiques et sociales [18].

Pour suivre cette démarche, il est essentiel de se baser sur un modèle conforme à ces exigences (stratégie basée sur les consommations, compatibilité avec les bilans énergétiques du pays), qui soit assez adaptable pour prendre en compte la complexité du système énergétique national, surtout en ce qui concerne la consommation finale des ménages et le mix électrique à long terme [18].

1.3.2 Critères de calcul des émissions des GES

- **L'année de référence (2022):** Les principaux critères concernent le choix de l'année de référence :
 - * Elle s'agit de la dernière année de l'inventaire national des GES pour assurer une cohérence avec des données officielles.
 - * Elle se caractérise par une disponibilité de données relativement complètes.
 - * C'est une année stable car elle n'a pas été marquée par des phénomènes cycliques de forte amplitude [18].
- **La base statistique:** L'établissement de l'inventaire national des GES requiert la coopération des divers secteurs et intervenants afin d'assurer le bon fonctionnement de la collecte et l'archivage des données, la coordination pour le choix des

facteurs d'émission tout en veillant à une compilation efficace et exacte des résultats d'émissions [18].

Ces données, plutôt exhaustives, couvrent une période suffisamment étendue pour mettre en évidence les tendances de croissance prévisionnelle des divers secteurs et sources d'énergie dans l'éventualité du scénario tendanciel ou scénario de référence.

- **Le périmètre de calcul de GES:** On procédera au calcul de tous les gaz à effet de serre tels que spécifiés par le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC/IPCC). Le calcul prend en compte tout le système énergétique, de la production à la transformation et jusqu'à la consommation finale, y compris l'auto-consommation des industries énergétiques. L'évaluation couvre tous les secteurs majeurs et toutes les formes d'énergie, primaire et dérivée. Ces données seront présentées selon la structure arborescente du modèle choisi. Le calcul s'effectuera en se basant sur le potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans, conformément aux facteurs d'émission standard du GIEC [18].

En effet, chaque GES a une durée de vie atmosphérique et un potentiel de rétention de la chaleur qui lui est propre. Le PRG permet de mesurer la capacité de chaque gaz à effet de serre à piéger la chaleur dans l'atmosphère, par rapport au dioxyde de carbone (CO_2) [18].

- **L'horizon temporel:** L'horizon temporel retenu s'étend jusqu'en 2050 avec des résultats selon des périodes quinquennales ou décennales en fonction de la pertinence des calculs. Cependant les données seront disponibles pour toutes les années couvrant la période 2022-2050 [18].

Le logiciel déployé LEAP possède une base de données très complète des facteurs d'émission tirés du GIEC. Cette base de données intègre les facteurs d'émission standards pour les gaz à effet de serre, ainsi que pour d'autres polluants tels que le CO.

1.3.3 Les outils de modélisation (simulation et optimisation)

On distingue plusieurs types de logiciels de modélisation, parmi lesquels nous allons nous concentrer sur deux logiciels d'optimisation (TIMES, MESSAGE) et deux logiciels de simulation (MedPro, LEAP).

- **Les logiciels d'optimisation** se basent sur des données relatives aux coûts et des contraintes liées aux caractéristiques des technologies ainsi qu'aux contraintes de politique (énergétique, environnementale, économique) pour déterminer la solution la plus appropriée qui reflète le coût minimal de l'offre afin de répondre à une demande énergétique [19].
- **Les logiciels de simulation** sont élaborés pour reproduire au mieux les dynamiques économiques et technologiques du système énergétique. L'objectif n'est pas obligatoirement d'atteindre l'optimal, mais plutôt d'obtenir une solution qui saisit toutes les dynamiques du système énergétique et tout nouvel équilibre entre les prix et les demandes. Les résultats peuvent être sensibles aux évolutions technologiques [19].

Le logiciel TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)

C'est un logiciel d'optimisation énergétique utilisé pour analyser les systèmes énergétiques sur le long terme. Il aide à déterminer la meilleure combinaison de technologies et de ressources pour minimiser les coûts d'un système énergétique sous différentes contraintes [19].

1. Inputs (Entrées du modèle) Le modèle TIMES prend en compte deux types d'entrées :

- Paramètres techniques :
 - * Capacité installée.
 - * Rendement.
 - * Disponibilité des technologies.
 - * Facteurs d'émission.

- * Potentiel solaire et éolien.
- * Demande régionale d'énergie.
- * Projets d'usines proposes.
- * Paramètres de stockage d'énergie.
- * Facteur de capacité des énergies renouvelables.
- Paramètres économiques:
 - * Coût d'investissement.
 - * Coût d'exploitation et de maintenance .
 - * Paramètres de commerce interregional [19].

2. Contraintes du modèle Le modèle TIMES fonctionne sous plusieurs contraintes qui influencent ses résultats :

- Contraintes cumulées dans le temps : limitations progressives sur certaines ressources ou technologies.
- Contraintes de pointe : prise en compte des pics de demande énergétique.
- Contraintes spécifiques aux scénarios : différentes politiques climatiques ou énergétiques peuvent être intégrées.
- Contraintes d'engagement unitaire : respect des limitations techniques des équipements [19].

3. Fonction objective de TIMES Le modèle cherche à minimiser la valeur actuelle nette des coûts du système énergétique. Cela comprend:

- Coût d'importation des énergies ou technologies.
- Coût du capital (investissement initial).
- Coût d'exploitation et de maintenance.
- Revenus provenant des exportations d'énergie ou de technologies.
- Valeur résiduelle des équipements [19].

4. Scénarios de modélisation TIMES permet d'explorer plusieurs scénarios énergétiques et climatiques, comme :

- Relations de transformation (ex. conversion du charbon en électricité).
- Équilibres énergétiques et d'émission (bilan des ressources et des émissions de GES).
- Objectifs politiques (ex. réduction des émissions de CO₂).
- Taxe carbone (impact économique d'une taxation des émissions de GES) [19].

5. Outputs (Résultats du modèle) Le modèle TIMES produit plusieurs résultats essentiels :

- Activités des processus énergétiques (ex. production d'électricité).
- Nouvelles capacités installées (ex. nouvelles centrales).
- Prix de l'énergie en fonction de l'offre et de la demande.
- Flux d'énergie et d'émissions (émissions de CO₂ associées aux différentes options énergétiques).
- Importations et exportations d'énergie.
- Commerce interrégional d'énergie [19].

Le logiciel MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)

C'est un logiciel d'optimisation énergétique utilisé pour la planification des systèmes énergétiques à long terme. Il est couramment utilisé pour l'évaluation des stratégies énergétiques et climatiques [19].

1. Entrées du modèle (INPUT) Le modèle MESSAGE prend en compte plusieurs types de données pour générer des scénarios énergétiques :

- Structure du système énergétique : Comprend les infrastructures existantes et leur âge (vintage des installations).
- Flux et prix de l'énergie pour une année de référence : Données de consommation et de production énergétique pour une année de référence.

- Demande énergétique (via le modèle MACRO) : Le modèle MESSAGE peut être couplé avec MACRO, un modèle économique qui simule la demande énergétique en fonction de la croissance économique.
- Technologies et ressources énergétiques : Options disponibles et leurs performances technico-économiques.
- Contraintes techniques et politiques : Réglementations environnementales, limitations techniques et politiques climatiques [19].

2. Fonctionnement du modèle (MESSAGE-ix) MESSAGE est un modèle d’optimisation qui cherche à minimiser les coûts du système énergétique tout en respectant les contraintes d’approvisionnement, de technologie et d’environnement. Il détermine la combinaison optimale de technologies et de ressources à utiliser dans le temps pour répondre à la demande énergétique de manière efficace et durable [19].

3. Résultats du modèle (OUTPUT) Le modèle MESSAGE génère plusieurs types de résultats :

- Mix énergétique primaire et final : Quelle part de l’énergie provient du charbon, du gaz, du nucléaire, des renouvelables, etc.
- Mix de production électrique : Quelle combinaison de technologies (éolien, solaire, charbon, etc.) est utilisée pour produire l’électricité.
- Investissements et expansions des capacités énergétiques : Besoins en nouvelles infrastructures et décisions de fermeture d’anciennes unités.
- Émissions de GES, pollution de l’air et déchets : Impact environnemental des différents scénarios énergétiques.
- Impact sur la santé et l’environnement : Évaluation des effets sur la qualité de l’air via le modèle GAINS et sur l’analyse du cycle de vie (LCA).
- Utilisation des ressources (énergie, eau, terres, matériaux) : Analyse des impacts sur l’utilisation des terres et des matières premières via GLOBIOM.
- Commerce et dépendance aux importations énergétiques : Évaluation de la sécurité énergétique et des besoins en importation.

- Prix de l'énergie : Impact des scénarios énergétiques sur le coût de l'énergie [19].

Le logiciel MedPro

C'est un cadre de modélisation de la demande énergétique, basé sur divers paramètres économiques, technologiques et sociaux. Il permet d'évaluer la consommation énergétique à travers différents secteurs et d'analyser les impacts des changements économiques et technologiques sur cette demande [19].

1. Entrées du modèle (Inputs) Les principales variables qui influencent la demande énergétique sont divisées en deux catégories :

- Variables socio-économiques : PIB, population, valeur ajoutée, prix de l'énergie, productivité...
- Technologies : Rendement énergétique, kilométrage, performance des nouveaux équipements...

2. Modélisation et structuration des données Le modèle propose deux types de flexibilité pour mieux représenter la demande énergétique :

- Niveau de désagrégation flexible : Permet d'analyser la demande selon plusieurs dimensions (par branche, par usage final, par type de véhicule, par zone géographique...).
- Endogénéisation des paramètres : Permet d'intégrer des paramètres évolutifs comme le nombre de véhicules, la production des industries énergivores et le stock de bâtiments [19].

3. Demande énergétique totale (Total Energy Demand) La demande énergétique est répartie entre plusieurs secteurs :

- Transport : Passagers et fret selon les modes de transport.
- Industrie : Utilisation de l'énergie pour des usages thermiques, électriques et non énergétiques.

- Résidentiel : Chauffage, eau chaude, climatisation, éclairage et autres usages électriques.
- Tertiaire : Électricité pour les services publics et l'éclairage public.
- Agriculture : Pompage de l'eau, utilisation d'énergie pour les tracteurs [19].

4. Sorties du modèle (Outputs)

- Demande par source d'énergie : Permet de quantifier l'utilisation des différentes sources d'énergie.
- Aspects socio-économiques : Impact de la demande énergétique sur la production industrielle, les stocks de véhicules, le trafic, les équipements résidentiels et tertiaires.
- Consommation spécifique : Analyse des produits et équipements énergivores, types de véhicules et usages finaux.
- Indicateurs : Intensité énergétique, dépenses énergétiques, émissions de CO₂ [19].

1.3.4 Eléments méthodologiques pour la modélisation

Il convient de noter que si le choix du logiciel approprié est une première étape importante, il existe également le choix de l'année de base et la schématisation du système énergétique qui permet d'entamer en bonne et due forme l'identification et la collecte des données. Par conséquent, il s'agit également des principaux éléments méthodologiques à rassembler avant la modélisation et la phase d'élaboration des scénarios [19].

Dans ce cadre, il est intéressant de signaler trois points importants :

- Le niveau de détail de la schématisation dépend du niveau de détail des données disponibles (Données technico-économiques sur les différentes technologies, données sur les demandes énergétiques) ;
- Pour chaque technologie spécifiée, doivent être identifiés les inputs et les outputs en termes d'énergie (Brute, Dérivée, finale). Cela permettra d'éviter des erreurs lors du processus de fonctionnement du modèle ;

- Les données technico-économiques doivent être établies en même unité de mesure.

1.3.5 Logiciel retenu : Low Emissions Alternative Platform (LEAP)

L'utilisation de LEAP a été mise en évidence de par sa pertinence. Le système est très efficace pour ce qui est du calcul des émissions GES. Il a l'avantage d'être compatibles avec les bilans énergétiques tels que ceux mis en place annuellement par le ministère de l'énergie. De plus, ce système est un logiciel ouvert et flexible qui autorise à l'utilisateur un degré de flexibilité très élevé et une grande transparence notamment dans les calculs et le choix des hypothèses ayant un impact important sur le profil des émissions de GES [18]. LEAP fait partie des modèles dits **bottom-up** c'est-à-dire en prenant comme point de départ la demande désagrégée où les besoins constituent la base du modèle. LEAP peut également fonctionner avec une base de données qui peut être limitée ce qui peut être utile pour la formation. En revanche, il est évident qu'une base de données restreinte ne permettra pas de définir des politiques alternatives pertinentes. Le logiciel LEAP, développé par le Stockholm Environment Institute (SEI), conçu à l'origine pour la planification énergétique à long terme (Long Term Energy Alternative Planning), répond à ces critères [18]. Plusieurs pays et institutions ont recours à ce modèle. L'arborescence suivante démontre les étapes de la construction du modèle ainsi que les principales composantes de chaque module. Les développements suivants et la méthodologie seront basés sur LEAP [18].

Flexibilité et facilité d'utilisation

LEAP a gagné la confiance de ses utilisateurs en exposant des concepts d'analyse énergétique complexes de façon transparente et intuitive. D'autre part, LEAP est assez flexible pour répondre aux besoins d'utilisateurs aux compétences variées : des spécialistes de renommée mondiale désireux de formuler des politiques et de démontrer leur valeur aux décideurs, jusqu'aux formateurs souhaitant développer

les compétences des jeunes analystes cherchant à appréhender la complexité des systèmes énergétiques [20].

Méthodologie de modélisation

LEAP n'est pas un modèle d'un système énergétique particulier, mais plutôt un outil qui peut être utilisé pour créer des modèles de différents systèmes énergétiques, chacun nécessitant ses propres structures de données uniques. LEAP prend en charge une large gamme de méthodologies de modélisation différentes : du côté de la demande, celles-ci vont des techniques de comptabilité d'utilisation finale ascendantes à la modélisation macroéconomique descendante. LEAP comprend également une gamme de méthodologies spécialisées optionnelles, notamment la modélisation de la rotation des stocks pour des domaines tels que la planification des transports. Du côté de l'offre, LEAP propose une gamme de méthodologies de comptabilité, de simulation et d'optimisation suffisamment robustes pour modéliser la production du secteur électrique et la planification de l'expansion des capacités, et qui sont également suffisamment flexibles et transparentes pour permettre à LEAP d'intégrer facilement les données et les résultats d'autres modèles plus spécialisés [20].

Analyse des scénarios

LEAP est structuré autour de l'idée d'analyse de scénarios. Les scénarios représentent des projections cohérentes qui illustrent comment un système énergétique pourrait se développer au cours du temps. Avec LEAP, les analystes politiques ont la possibilité de concevoir et d'évaluer des scénarios alternatifs en mettant en comparaison leurs exigences énergétiques, leurs coûts et bénéfices sociaux ainsi que leurs effets sur l'environnement.

L'outil de gestion des scénarios LEAP, est capable de décrire des mesures politiques spécifiques qui peuvent par la suite être assemblées en diverses combinaisons et permutations dans des scénarios alternatifs intégrés. Cette méthode donne aux responsables politiques la possibilité d'apprécier l'effet d'une politique spécifique,

ainsi que les interactions qui surviennent lorsque plusieurs initiatives et actions sont regroupées [20].

Faibles exigences initiales en matières de données

L'un des principaux avantages de LEAP est ses faibles exigences initiales en matière de données. Plusieurs outils de modélisation reposent sur des algorithmes spécifiques et généralement assez compliqués, comme l'optimisation, ce qui engendre souvent des critères stricts en matière de données. La constitution de données pour ces types de modèles est une tâche qui prend du temps et qui exige un niveau d'expertise assez élevé.

Cependant, le fait qu'il propose une variété de méthodologies de modélisation et que plusieurs éléments de LEAP sont optionnels, et transparentes [20].

1.4 Conclusion

Le changement climatique représente l'un des défis majeurs du XXI^e siècle, nécessitant une transition vers des systèmes énergétiques plus durables et résilients. La modélisation joue un rôle important dans cette transition en permettant d'anticiper les impacts des choix énergétiques et d'évaluer l'efficacité des politiques climatiques.

Parmi les nombreux outils de modélisation, LEAP se distingue par sa flexibilité et sa capacité à analyser des scénarios énergétiques et environnementaux. Dans le chapitre suivant, nous découvrons en détail l'outil LEAP, ses interfaces, étapes de construction et son application dans la modélisation énergétique et climatique.

Chapitre 2

Modélisation des émissions énergétiques des gaz à effet de serre du secteur de l'industrie

2.1 Introduction

Dans le cadre de l'élaboration de scénarios de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'analyse des secteurs industriels représente un enjeu majeur. Le présent chapitre est consacré à la modélisation des émissions issues des activités industrielles liées à la production et à l'utilisation de l'énergie, ainsi qu'aux émissions générées par l'industrie manufacturière et le secteur de la construction. Ces secteurs figurent parmi les plus intensifs en énergie et en carbone, en raison de leur forte consommation de combustibles fossiles, de procédés thermiques lourds et de la production de matériaux à forte empreinte carbone, tels que le ciment, l'acier ou l'aluminium.

L'objectif de ce chapitre est, d'une part, caractériser les sources d'émissions spécifiques à ces secteurs et, d'autre part, décrire la méthodologie adoptée pour leur modélisation dans le cadre de l'outil LEAP.

Cette approche inclut la collecte et l'intégration de données sectorielles, la définition des paramètres d'entrée (données d'activités, facteurs d'émission...) et la structuration des branches industrielles dans le modèle. La méthodologie vise à simuler les trajectoires d'émissions dans un scénario de référence, tout en permettant l'analyse d'impacts de mesures d'atténuation potentielles.

Ce chapitre constitue ainsi une base technique essentielle à la compréhension des résultats présentés par la suite, et permet d'assurer la transparence, la rigueur du processus de modélisation adopté.

2.2 Interfaces du LEAP

LEAP est structuré comme une série de vues d'un système énergétique.

2.2.1 Vue d'analyse

La vue d'analyse principale (illustrée dans la figure 2.1) est l'endroit où les utilisateurs créent des structures de données et des scénarios et saisissent toutes les données décrivant à la fois les années historiques et les scénarios prospectifs. Dans la vue d'analyse, un arbre hiérarchique affiche la structure de données principale pour l'analyse, il offre une grande flexibilité dans la manière dont un système est modélisé [21].

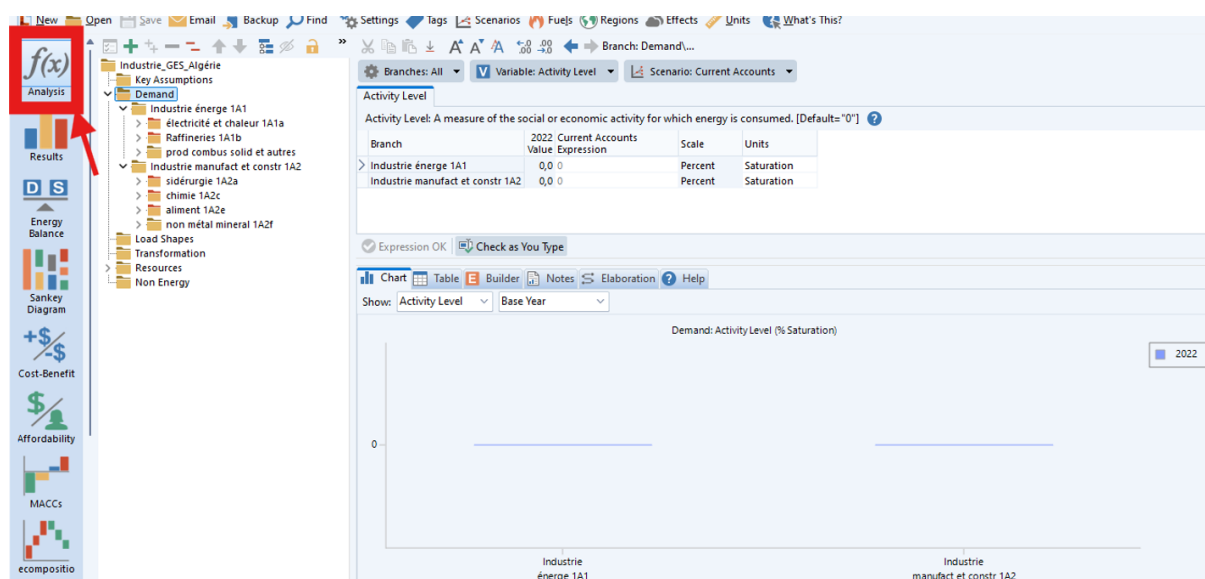


Figure 2.1: La vue d'analyse de LEAP [21]

2.2.2 Affichage des résultats

Le reporting intuitif est un autre élément clé de LEAP, qui aide les utilisateurs à visualiser et interpréter les résultats et à détecter les erreurs. LEAP calcule un vaste ensemble de résultats, qui peuvent être affichés sous forme de graphiques, de tableaux et même de cartes. La vue Résultats (illustrée dans figure 2.2) facilite grandement le travail avec des résultats multidimensionnels. Par exemple, les résultats de la demande énergétique sont calculés sur cinq dimensions : combustibles, années, scénarios, régions et branches (c'est-à-dire les secteurs et sous-secteurs de l'analyse) [21].

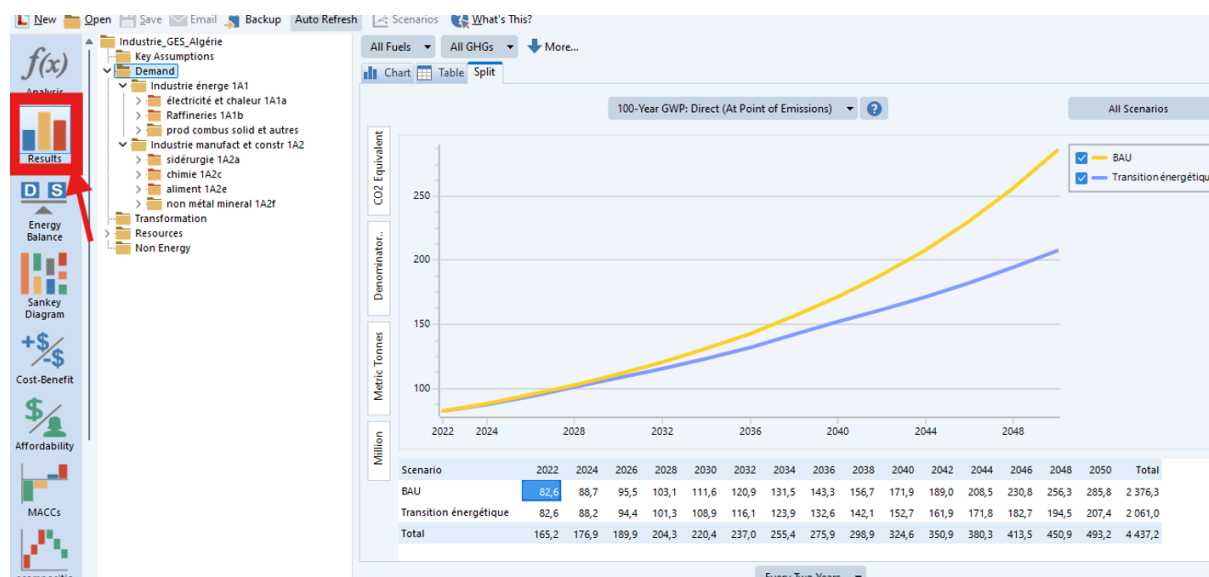


Figure 2.2: Affichage des résultats sur LEAP [21]

2.2.3 Arbre et arborescence

L'arborescence, apparente dans les vues d'analyse et du résultat, est un schéma hiérarchique employé pour structurer et ajuster les structures de données essentielles lors d'une analyse LEAP. Dans l'interface d'analyse, il est possible de personnaliser la structure de l'arborescence et de choisir les données que vous souhaitez visualiser et ajuster. Dans la vue des résultats, on utilise l'arborescence pour accéder aux divers résultats calculés pour différentes branches de l'arborescence (comme la demande d'énergie dans un secteur spécifique ou la production d'électricité dans diverses centrales) [21]. Dans LEAP, les données sont organisées sous forme d'un arbre hiérarchique, dont les branches principales correspondent aux grandes catégories suivantes :

- Demande : structure désagrégée pour modéliser la consommation énergétique selon différents secteurs [21].
- Transformation : modélise les conversions d'énergie (électricité, raffinage, chaleur, etc.). Elle se compose de modules représentant les secteurs énergétiques et de processus décrivant les installations spécifiques. Chaque processus inclut des données technico-économiques (capacités, rendements, coûts, émissions...) [21].
- Ressource : couvre la production locale, l'importation et l'exportation de

combustibles [21].

- Branche catégorie : Branches hiérarchiques servant à organiser la structure des modules (secteurs, sous-secteurs, utilisations finales).
- Branche technologique : Les branches technologiques sont utilisées dans les branches Demande pour représenter les appareils consommateurs d'énergie finale et sont donc associées de manière unique à un combustible spécifique.

Elles sont également utilisées dans les branches Transformation pour indiquer les processus : les technologies individuelles ou les groupes de technologies au sein d'un module responsables de la conversion ou du transport des formes d'énergie, comme une centrale électrique ou une raffinerie de pétrole. Les processus de transformation sont représentés par une icône grise en forme de roue dentée, tandis que dans les branches Demande, trois types différents peuvent être créés, selon le type d'analyse à réaliser:[21].

- * Technologie avec intensité énergétique : permettent de spécifier les technologies consommatrices d'énergie finale. Par conséquent, lors du choix de ce type de branche, vous devrez également sélectionner le combustible consommé. Utilisez ce type de branche pour projeter la consommation d'énergie comme le produit d'un niveau d'activité et d'une intensité énergétique [21].
- * Technologie avec énergie totale : Utilisez ce type de branche pour projeter directement la consommation d'énergie en saisissant les données sur l'énergie totale consommée. Autrement dit, ce type de branche ignore les données saisies dans la variable Niveau d'activité [21].
- * Les technologies de stock : sont utilisées lorsque la consommation d'énergie est calculée en analysant la rotation des stocks d'appareils consommateurs d'énergie [21].
- * Les technologies de transport : sont utilisées lorsque la consommation d'énergie est calculée en analysant la rotation du parc de véhicules [21].
- Branche combustible : Elles représentent les combustibles produits, importés ou exportés dans les modules Transformation, Ressources, et dans les variations

de stock [21].

- Effet : elles permettent d'indiquer les émissions de polluants, que ce soit dans les secteurs énergétiques ou non énergétiques [21].
- Hypothèses clés : variables indépendantes servant à piloter les calculs des modules (demande, transformation, ressources). Elles ne sont pas calculées mais utilisées comme références dans les équations [21].

2.2.4 Bilans énergétiques

LEAP permet de générer automatiquement des résultats sous forme de rapports de bilan énergétique au format standard. Ces rapports suivent fidèlement le format standard utilisé par l'AIE (Agence Internationale d'Energie) et la plupart des agences nationales de planification énergétique. Les bilans énergétiques de LEAP peuvent être affichés sous forme de tableaux, de graphiques et de diagrammes de Sankey et peuvent être personnalisés pour synthétiser les informations par catégories de combustibles détaillées ou simplifiées, pour différentes années ou régions. Les résultats des bilans énergétiques peuvent également être présentés par secteur ou sous-secteur, dans n'importe quelle unité énergétique [21].

2.2.5 Diagramme de Sankey

Les diagrammes de Sankey permettent de visualiser les flux de bilan énergétique de toute zone modélisée dans LEAP, depuis les ressources jusqu'à la demande en passant par chaque module de transformation. Ils incluent une représentation détaillée des importations, des exportations, des variations de stocks, des écarts statistiques et des pertes d'énergie, et peuvent être affichés pour n'importe quelle année et pour n'importe quel scénario [21].

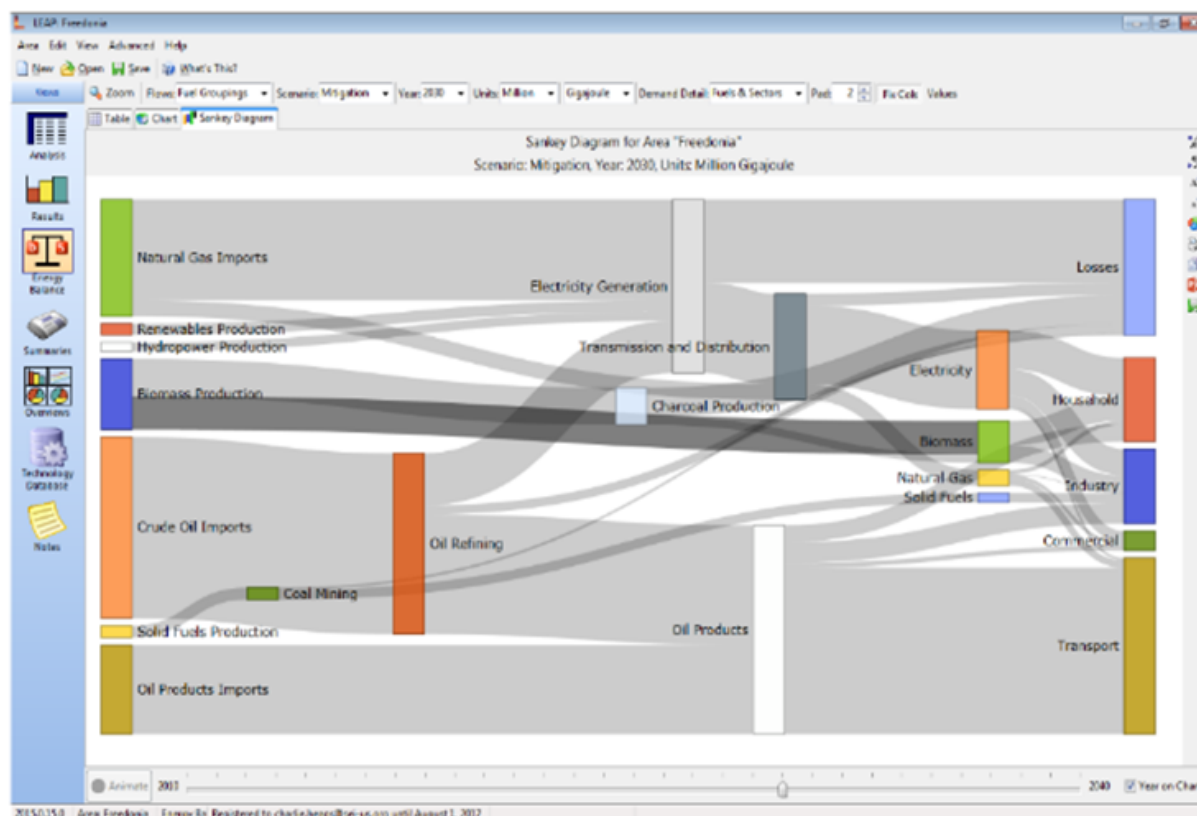


Figure 2.3: Diagramme de Sankey [21]

2.3 Les scénarios étudiés

Hormis le scénario de référence, un autre scénario a été étudié : le scénario d'atténuation qui est un scénario de transition énergétique avec une pénétration des énergies renouvelables dans le système électrique et une pénétration de l'électricité, en grande partie d'origine renouvelable, dans les stratégies d'atténuation des émissions de GES [22].

Le scénario BAU est un scénario de référence très utilisé, qui représente ce qui se passerait si aucune nouvelle politique ou mesure climatique n'était mise en œuvre après une date donnée (2022), il montre l'évolution naturelle du système sans intervention supplémentaire, en se basant sur des hypothèses économiques, démographiques, la demande énergétique ainsi que des politiques climatiques.

Le second scénario de transition énergétique est un scénario qui vise à explorer les trajectoires possibles de réduction des émissions de gaz à effet de serre à travers la mise en œuvre de politiques climatiques, de mesures technologiques et de changements structurels dans les secteurs économiques. Selon le GIEC, ces scénarios supposent

une transformation rapide du système énergétique, une amélioration de l'efficacité énergétique, l'adoption de technologies bas-carbone, ainsi que des mesures comportementales et institutionnelles. Ces trajectoires sont compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.

Les hypothèses sont formulées afin que le mix énergétique reflète les lignes directrices, les principes et fondements de la politique énergétique, c'est-à-dire un mix énergétique plus équilibré, compatible avec le développement économique, social et environnemental [22].

Construction de l'architecture (L'arbre)

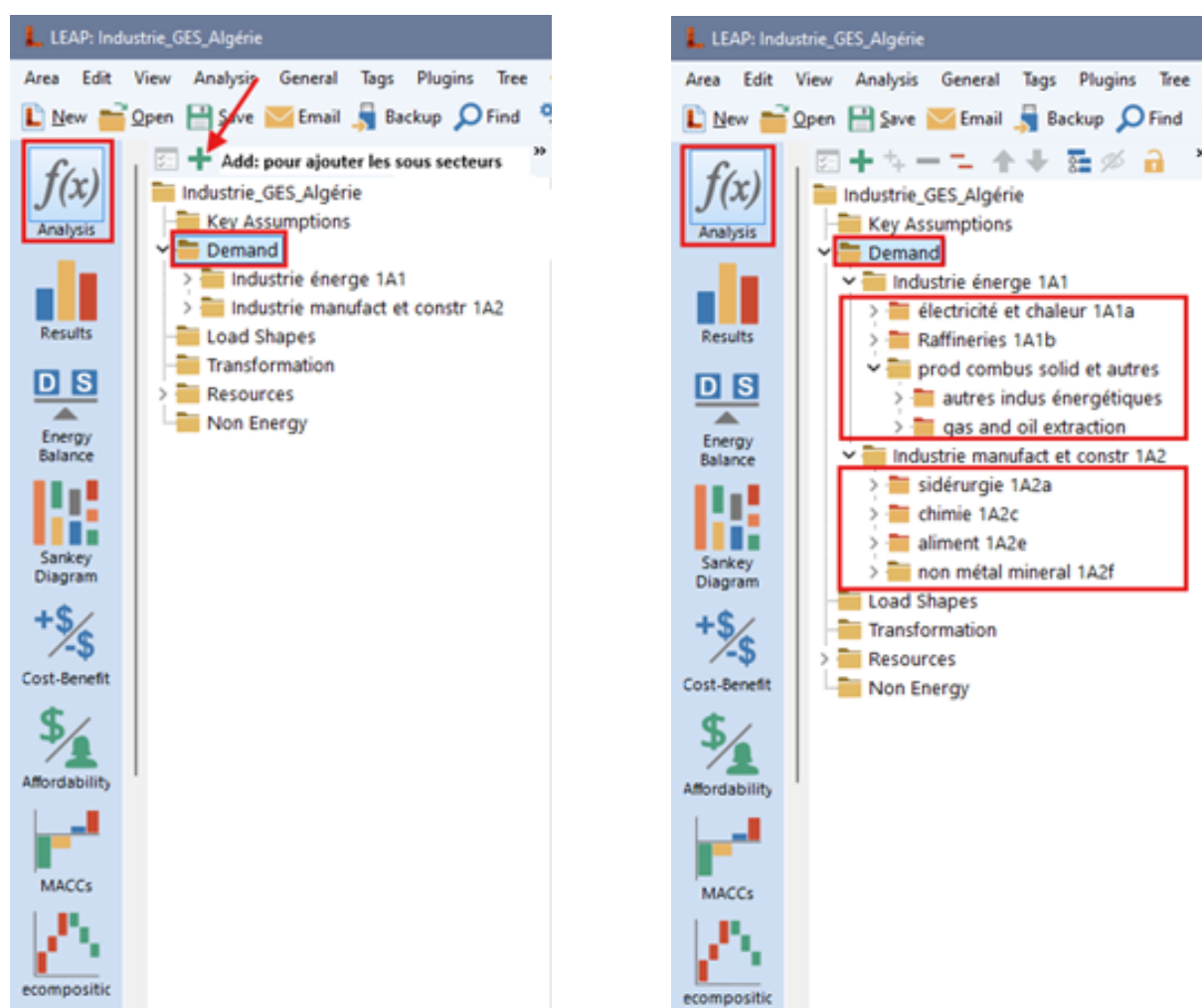


Figure 2.4: La structure hiérarchique des sous secteurs sur LEAP

Document d'inventaire national des émissions des GES (NID)

Le Document d'Inventaire National est un document structuré et détaillé qui compile toutes les informations relatives aux émissions et absorptions de gaz à effet

de serre (GES) d'un pays, en accord avec les lignes directrices du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Ce document vise à fournir une image complète et vérifiable des émissions de GES et à rendre compte des progrès accomplis par les pays dans la mise en œuvre de leurs engagements climatiques, en particulier les Contributions Déterminées au Niveau National (CDN). Selon l'UNFCCC (2019), le NID doit inclure les données d'activité, les facteurs d'émission, les méthodes de calcul, ainsi que les incertitudes associées. Il est un outil essentiel pour assurer la transparence dans le cadre des négociations internationales sur le climat [24].

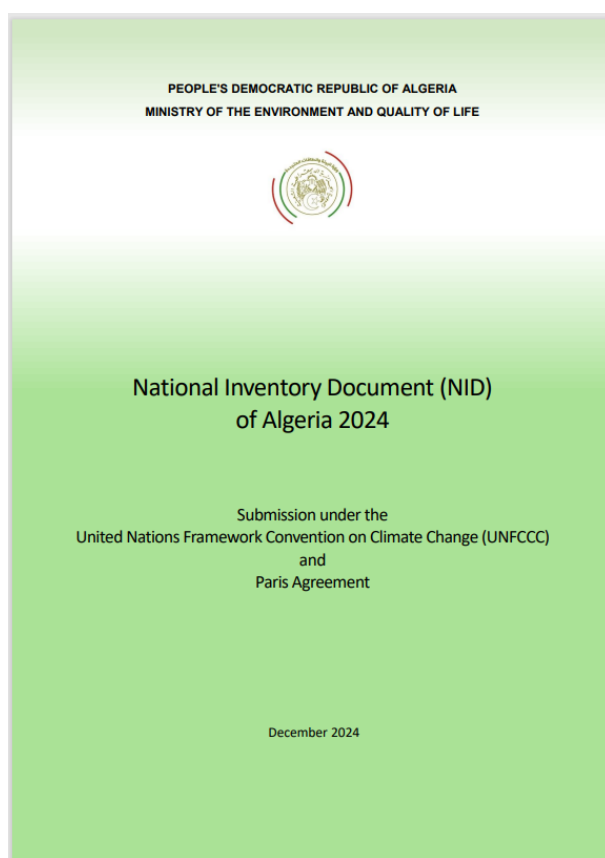


Figure 2.5: Document d'inventaire national

Son rôle dans la transparence climatique

Dans le contexte de transparence accrue établi par l'Accord de Paris, le NID occupe une position essentielle. Conformément à la décision 18/CMA.1 de l'UNFCCC (2019), il est requis que les pays présentent leur Inventaire National des GES dans un format normalisé, facilitant ainsi une analyse transparente de leurs émissions. Il est essentiel d'assurer la transparence pour garantir que les nations respectent leurs engagements en matière de climat, que cela concerne la diminution de leurs émissions ou le soutien aux initiatives d'adaptation. Le NID facilite la comparaison des données à l'échelle internationale, contribuant ainsi à une évaluation globale des efforts mondiaux. Au-delà de la simple fourniture d'informations quantitatives sur les émissions et les absorptions, le NID offre également des informations sur les incertitudes méthodologiques, les mises à jour des données, et les révisions des inventaires, permettant ainsi un suivi rigoureux des progrès réalisés dans la réduction des émissions [24].

Les données disponibles dans le NID

Le document comprend un large éventail de données essentielles qui incluent des données d'activité provenant des secteurs clés tels que l'énergie, l'agriculture, l'industrie, et les déchets, ainsi que des facteurs d'émission qui permettent de convertir ces données en émissions de GES. Ces informations sont collectées selon des méthodes normalisées (Tier 1, Tier 2, Tier 3) du GIEC qui varient selon la précision et la disponibilité des données. Par exemple, les données d'activité peuvent être obtenues à partir de sources comme les statistiques nationales de production d'énergie ou les inventaires industriels. Les facteurs d'émission sont utilisés pour estimer les émissions de GES à partir des données d'activité et sont également basés sur des lignes directrices internationales telles que celles du GIEC ainsi que les incertitudes des données sont également prises en compte dans le NID [24].

Comment utiliser ces données dans la modélisation

Les données issues du NID jouent un rôle fondamental dans la modélisation prospective des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'aide d'un outil comme LEAP, et pour cela il faut calibrer le modèle, en alignant les émissions historiques modélisées dans LEAP avec les valeurs officielles des données d'activité rapportées dans le NID pour les années de référence.

Comme illustré dans le tableau 1 en annexe , les données d'activité sont mentionnées de 1990 jusqu'au 2022, pour chaque type de combustibles des sous-secteurs, ce tableau est le cas de l'industrie sidérurgique. Notre objectif est d'utiliser ces données pour alimenter le modèle et commencer la modélisation.

Tableau 2.1: Les données d'activité par type de combustible dans le sous-secteur 1.A.2.a industrie sidérurgique en (TJ) issu du NID

Année	Total fuels (incl. biomass)	Liquid fuels	Solid fuels	Gaseous fuels	Other fossil fuels	Peat	Biomass
1990	8,654.20	IE	1,200.00	7,454.20	NO	NO	NO
1991	9,390.82	IE	1,200.00	8,190.82	NO	NO	NO
1992	9,682.31	IE	1,250.00	8,432.31	NO	NO	NO
1993	8,648.23	IE	1,300.00	7,348.23	NO	NO	NO
1994	8,248.23	IE	900.00	7,348.23	NO	NO	NO
1995	8,148.23	IE	800.00	7,348.23	NO	NO	NO
1996	10,703.00	IE	1,100.00	9,603.00	NO	NO	NO
1997	13,409.74	2,761.14	1,348.00	9,300.60	NO	NO	NO
1998	15,298.65	2,925.98	1,348.00	11,024.67	NO	NO	NO
1999	14,546.22	3,420.51	2,324.00	8,801.71	NO	NO	NO
2000	16,198.25	3,626.57	2,550.00	10,021.68	NO	NO	NO
2001	16,118.54	4,244.73	2,048.55	9,825.25	NO	NO	NO
2002	17,061.53	4,615.63	1,915.25	10,530.64	NO	NO	NO
2003	17,257.21	4,698.05	1,836.98	10,722.17	NO	NO	NO
2004	17,750.54	5,110.16	1,677.95	10,962.43	NO	NO	NO
2005	23,344.28	5,439.85	3,740.37	14,164.05	NO	NO	NO
2006	24,574.73	6,058.02	3,818.44	14,697.88	NO	NO	NO
2007	21,109.20	6,181.65	2,351.55	12,576.00	NO	NO	NO
2008	19,014.41	IE	2,706.98	13,590.00	NO	NO	NO
2009	13,592.65	IE	2.65	13,590.00	NO	NO	NO
2010	13,248.59	IE	1,414.34	11,834.25	NO	NO	NO
2011	12,340.22	3.10	1,356.97	10,980.14	NO	NO	NO
2012	9,086.00	4.11	722.19	9,079.70	NO	NO	NO
2013	9,685.47	6.43	594.35	9,084.69	NO	NO	NO
2014	9,207.06	9.71	616.91	8,580.45	NO	NO	NO
2015	5,587.19	22.69	NO	5,564.50	NO	NO	NO
2016	10,685.36	14.88	662.01	10,008.47	NO	NO	NO
2017	18,017.18	33.45	894.27	17,089.47	NO	NO	NO
2018	34,767.47	2,260.32	820.98	31,686.17	NO	NO	NO
2019	38,640.25	2,119.60	437.16	36,083.69	NO	NO	NO
2020	53,432.49	2,399.28	1,404.96	49,628.25	NO	NO	NO
2021	58,137.00	2,262.13	973.66	54,901.21	NO	NO	NO
Tendance 1990–2022	571.8%	NA	-18.9%	636.5%	NA	NA	NA
Tendance 2010–2022	327.7%	NA	36,667.6%	304.0%	NA	NA	NA
Tendance 2021–2022	8.8%	-5.7%	-30.7%	10.6%	NA	NA	NA

- NA: Not Available
- NO: Not Occuring

Les émissions de GES vont dépendre, hormis la consommation totale, des facteurs d'émission des différentes formes d'énergie. Le modèle dispose d'une base de données très complète des facteurs d'émission extraits de IPCC. Cette base donnée comprend les facteurs d'émission par défaut des GES mais également des autres polluants comme le monoxyde de carbone. Ces facteurs d'émission pourraient être changés si le pays dispose de données plus précises. Dans le cas contraire, il est fortement recommandé d'utiliser cette base de données [22].

Tableau 2.2: Les facteurs d'émissions du secteur de l'industrie selon IPCC Tier 1 sur LEAP (TJ)

Effect	Loading	Units
Carbon Dioxide	55 781,054	kg/TJ consumed
Carbon Monoxide	30,000	kg/TJ consumed
Methane (Combustion and Biogenic)	5,000	kg/TJ consumed
Non Methane Volatile Organic Compounds	5,000	kg/TJ consumed
Nitrogen Oxides	150,000	kg/TJ consumed
Nitrous Oxide	0,100	kg/TJ consumed
Sulfur Dioxide	0,000	kg/TJ consumed

Les données d'activité des combustibles pour chaque sous-secteur

Dans le secteur de l'énergie, les données d'activité correspondent généralement aux quantités de combustibles brûlés [23]. Dans le cadre des inventaires nationaux de gaz à effet de serre (GES), correspondent à la quantité d'énergie consommée par type de combustible, secteur et sous-secteur, exprimée généralement en terajoules (TJ).

Ces données représentent la base quantitative sur laquelle sont appliqués les facteurs d'émission pour estimer les émissions de GES dues à la combustion de carburants fossiles ou à d'autres processus énergétiques.

2.4 Les hypothèses du scénario de référence

Dans le cadre des études de scénarios futurs, le scénario Business As Usual (BAU) est souvent utilisé pour estimer l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en l'absence de nouvelles politiques climatiques. Selon le GIEC, le scénario BAU repose sur l'extrapolation des tendances passées en matière de croissance économique, démographique, et énergétique, sans intervention significative pour réduire les émissions. Ce type de scénario est essentiel pour évaluer les écarts entre les trajectoires actuelles et celles envisagées dans des scénarios de réduction des émissions. Donc, il s'agit d'une analyse de tendances passées (2010-2022) pour fonder les scénarios futurs du scénario BAU, selon l'expression du taux de croissance annuel moyen suivante :

$$\text{TCAM}_{\text{BAU}} = \left(\frac{\text{Valeur en 2022}}{\text{Valeur en 2010}} \right)^{\frac{1}{2022-2010}} - 1 \quad (1)$$

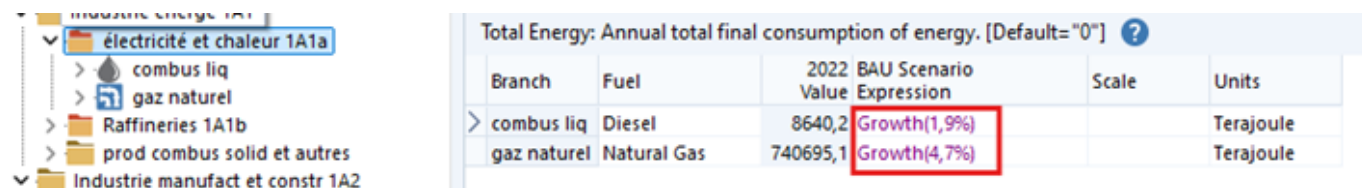
Tableau 2.3: Les inputs de calcul des TCAM BAU de chaque type de combustible des sous-secteurs

Catégorie IPCC	Sous-secteur	Type de combustible	Donnée 2010 (TJ)	Donnée 2022 (TJ)
1A1a	Production d'électricité et de chaleur	Gaz naturel	426,180.77	740,695.06
		Combustible liquide (Diesel)	6,870.08	8,640.20
1A1b	Raffinage du pétrole	Gaz naturel	50,259.62	55,432.01
1A1c	Production des combustibles solides	Gaz naturel	273,545	321,947
1A1c	Autres indus énergétiques	Gaz naturel	125,672.19	104,948.07
1A2a	Industrie sidérurgique	Combustible liquide (Diesel)	IE	2,262.13
		Combustible liquide (LPG)	IE	2,262.13
		Gaz naturel	13,590.00	54,901.21
1A2c	Industrie chimique	Gaz naturel	1,881.99	5,411.78
		Combustible liquide (Diesel)	68.99	140.46
		Combustible liquide (LPG)	68.99	140.46
		Autre Kérosène	68.99	180.46
		Autres produits pétrole	68.99	180.46
1A2e	Industrie agroalimentaire	Gaz naturel	12,686.29	24,357.78
		LPG	2.36	18.67
1A2f	Industrie non métallique	Gaz naturel	88,402.79	148,950.08
		Combustible liquide (Diesel)	3,597.58	635.72
		Combustible liquide (LPG)	3,597.58	635.72
		Autres produits du pétrole	3,597.58	635.72

IE : Included Elsewhere

2.5 Modélisation du scénario de référence

Dans le BTR, le scénario BAU reflète la poursuite des tendances sans mesures nouvelles, tandis que les scénarios d'atténuation sont élaborés par périodes temporelles successives, permettant de refléter l'introduction graduelle des actions climatiques.



Total Energy: Annual total final consumption of energy. [Default= "0"] ?					
Branch	Fuel	2022 BAU Scenario Value	Expression	Scale	Units
> combus liq	Diesel	8640,2	Growth(1,9%)		Terajoule
> gaz naturel	Natural Gas	740695,1	Growth(4,7%)		Terajoule

Figure 2.6: Etablissement du scénario de référence

Les résultats seront accessibles dans l'interface dédiée à l'affichage des résultats.

2.6 Les hypothèses du scénario d'atténuation

L'Algérie a souscrit à l'ensemble des décisions prises dans le cadre de la lutte contre le changement climatique par les Nations-Unies depuis le Sommet de la Terre de 1992 à Rio qui a vu l'adoption de Convention-Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) [22]. Et donc, elle doit mettre en œuvre des mesures d'atténuation pour chaque sous-secteur industriel, selon ces hypothèses du scénario de transition énergétique, on estime les taux de croissance annuel moyen pour chaque sous-secteur et par branches (2022-2030 ; 2031-2040 ; 2041-2050) pour prendre en considération les évolutions technologiques et la mise en œuvre de ces actions d'atténuation. Ces hypothèses sont basées sur :

- Les meilleures pratiques internationales (IEA, IPCC),
- Les tendances technologiques,
- Les potentiels de décarbonation par sous-secteur,
- Le contexte de l'Algérie (mix énergétique fossile, besoin en modernisation industrielle, etc.)

2.6.1 Sous-secteur lié aux activités énergétiques

- L'introduction progressive du solaire PV et CSP. L'Algérie a déjà initié des projets d'énergie solaire dans le sud du pays, notamment à Hassi R'mel, où une centrale hybride gaz-solaire et solaire thermodynamique (CSP) de **25 MW** a été mise en service, marquant une première en Afrique du Nord. Par ailleurs, des zones comme Touggourt bénéficient de projets photovoltaïques (PV), en raison de leur fort ensoleillement, dans le cadre de la stratégie nationale visant à atteindre **15 000 MW** d'énergies renouvelables d'ici 2035. Ces initiatives illustrent le potentiel élevé du solaire, tant photovoltaïque que thermodynamique, dans le sud algérien.
- La récupération de chaleur fatale perdue et non valorisée générée par des procédés industriels ou des équipements thermiques afin de produire de l'électricité et de la chaleur simultanément (cogénération).
- Le rendement amélioré des centrales à gaz (cycle combiné) qui consiste à utiliser à la fois une turbine à gaz et une turbine à vapeur pour produire plus d'électricité avec la même quantité de gaz, ce qui permet d'augmenter l'efficacité et de réduire significativement les émissions de CO₂, l'Algérie vise à introduire l'hydrogène vert avec le gaz naturel pour ce type de centrale.
- Les normes d'efficacité énergétique renforcées pour les nouvelles centrales.
- Le remplacement du diesel par du biogaz ou biodiesel dans les petites chaudières.
- La conversion des groupes électrogènes diesel vers le solaire.
- L'élimination du diesel progressive dans les zones industrielles avec accès au gaz/électricité.
- L'électrification des équipements auxiliaires en remplaçant des moteurs ou pompes thermiques par des moteurs électriques, alimentés idéalement par de l'électricité décarbonée, avec des essais pilotes pour valider la faisabilité.
- Le remplacement des équipements anciens par des technologies plus modernes, plus efficaces et moins émissives, souvent dans le cadre de plans de modernisation industriels.

Electricité et chaleur

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Lancement de projets solaires et la cogénération	8
2031-2040	Déploiement à plus grande échelle	15
2041-2050	Introduction d'hydrogène vert et électrification poussée	20

Diesel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Remplacement du diesel par du biogaz ou biodiesel dans les petites chaudières	10
2031-2040	Elimination du diesel progressive dans les zones industrielles avec accès au gaz/électricité	15
2041-2050	Conversion des groupes électrogènes diesel vers le solaire	20

Raffinage

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Installation de chaudières et fours plus performants	7
2031-2040	Récupération de chaleur fatale	12
2041-2050	Amélioration de l'efficacité énergétique	20

Production des combustibles solides

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Modernisation industrielle	6
2031-2040	Optimisation des procédés industrielle	10
2041-2050	Introduction des EnR	15

Autres industries énergétiques

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Amélioration de l'efficacité des procédés industriels	8
2031-2040	Récupération de chaleur	13
2041-2050	Introduction des ENR	18

2.6.2 Industrie sidérurgique

- Amélioration de l'efficacité énergétique dans les procédés de production :
 - * Mise en œuvre de technologies plus efficaces pour les fours de réduction directe (DRI) qui est un procédé qui produit du fer sans passer par les hauts-fourneaux traditionnels, avec réduction jusqu'à 40 % de CO₂ en moins comparé au haut fourneau classique [25].
 - * Utilisation partielle de l'hydrogène dans la réduction du minerai en combinaison avec les fours DRI.
 - * Efficacité énergétique avec préchauffage de l'air, récupération de chaleur.

- * Le recyclage de la ferraille (déchets métalliques) et la réduction des émissions en évitant les procédés primaires de production des mineries [22], ce qui permet une réduction de 60% à 75% [26].

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Efficacité énergétique avec préchauffage de l'air, récupération de chaleur	10
2031-2040	Recyclage de la ferraille	15
2041-2050	Introduction des fours DRI avec hydrogène vert	22

2.6.3 Industrie chimique

- Utilisation de technologies propres et l'adoption de technologies moins polluantes est encouragée pour diminuer les émissions de GES dans l'industrie chimique.
- Amélioration de l'efficacité énergétique et prendre des mesures pour optimiser les processus de production et réduire la consommation d'énergie dans les industries chimiques :
 - * Remplacer les chaudières et fours à combustion par des systèmes électriques alimentés en énergie renouvelable ce qui permet une réduction de 20%.
 - * Captage et valorisation du CO₂, qui permet de réduire jusqu'au 50% des émissions des GES d'industrie chimique [27].
 - * Utilisation des réacteurs plus performants qui accélèrent les réactions avec moins de consommation d'énergie, ce qui permet une réduction de 20% à 40% [28], comme les réacteurs catalytiques à haute efficacité, qui accélèrent les réactions à des températures et pressions plus basses, les réacteurs tubulaires ou multitubulaires optimisés souvent utilisés pour la production d'ammoniac, d'hydrogène ou de méthanol, ils permettent un meilleur transfert de chaleur, avec une conception qui réduit les pertes énergétiques.
- Développement de procédés chimiques circulaires (chimie verte, qui sert à développer et utiliser des procédés chimiques respectueux de l'environnement et plus sûrs pour

la santé humaine. Son objectif principal est de réduire ou éliminer l'utilisation et la production de substances dangereuses dans toutes les étapes de la fabrication chimique).

- Intégration de systèmes de récupération de chaleur fatale sur les procédés exothermiques pour préchauffer l'eau ou les flux entrants, réduisant ainsi la demande énergétique.

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Utilisation des réacteurs plus performants	10
2031-2040	Remplacer les chaudières et fours à combustion par des systèmes électriques alimentés en énergie renouvelable	15
2041-2050	Développement de procédés chimiques circulaires	22

Combustibles liquides

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Récupération de chaleur	12
2031-2040	Amélioration de l'efficacité énergétique	15
2041-2050	Optimisation des procédés industrielles	18

2.6.4 Industrie agroalimentaire

- Passage à des réfrigérants à faible PRG (Potentiel de Réchauffement Global) : les systèmes de réfrigération, congélation et climatisation utilisent des fluides frigorigènes (ou réfrigérants) pour transférer la chaleur. Or, certains réfrigérants (comme les HFC) sont des gaz à effet de serre puissants avec un GWP très élevé (jusqu'à 1000 à 4000 fois celui du CO₂). L'action d'atténuation consiste à remplacer ces réfrigérants

à fort PRG par des alternatives à faible PRG, comme HFO (nouvelle génération) qui est proche du HFC en termes de performance avec un faible PRG, ou l'ammoniac qui est connu comme une bonne alternative qui permet de réduire les émissions de 68% [29].

- Substitution par des sources d'énergie renouvelable en remplaçant les chaudières à fuel ou diesel par des chaudières électriques alimentées par ENR, ou installer des systèmes de chauffage solaire.
- Utilisation de biomasse ou bioénergie en remplaçant les énergies fossiles (charbon, fioul, gaz naturel) utilisées pour produire de la chaleur ou de l'électricité dans les installations agroalimentaires par de la biomasse ou des résidus organiques issus de l'agriculture ou de l'industrie, par exemple :
 - * Brûler des coques de fruits, noyaux d'olives, résidus de céréales pour produire de la vapeur ou de la chaleur, le pellet par exemple permet une réduction jusqu'à 94% [30].
 - * Produire du biogaz à partir des déchets alimentaires ou d'effluents (digestion anaérobie), puis l'utiliser comme carburant ou source de chaleur, le biométhane réduit les émissions à 80% [31].
- Limiter les pertes alimentaires et le gaspillage à toutes les étapes : production, transformation, stockage, transport, distribution et consommation.

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Substitution progressive des réfrigérants HFC	6
2031-2040	Projets de biogaz et biomasse dans des unités locales	10
2041-2050	Réduction du gaspillage et optimisation des procédés industrielles	15

Combustibles liquides

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Récupération de chaleur	12
2031-2040	Amélioration de l'efficacité énergétique	15
2041-2050	Optimisation des procédés industrielles	18

2.6.5 Industrie cimentière

- Amélioration de l'efficacité énergétique en adoptant de nouvelles technologies :
 - * Rénovation des brûleurs gaz des fours, pour optimiser le mélange air/gaz et réduire la consommation de gaz naturel, cette optimisation améliore le rendement thermique du four et diminue la consommation de combustible. Selon des études techniques, cette amélioration peut augmenter l'efficacité du four d'environ +8%. Cela se traduit par une réduction de l'ordre de 5–8% de la consommation de gaz naturel et donc de CO₂ [32].
 - * Remplacement des refroidisseurs par une version "à air" et y coupler un système de récupération de chaleur (ex. turbine à vapeur) permet de produire de l'électricité sur site. Typiquement, on peut générer 30 kWh d'électricité par tonne de clinker traité [33], ce qui permet une réduction de 3% à 5%.
 - * Mise en place de batteries de compensation de l'énergie réactive pour stabiliser et améliorer la qualité de l'électricité utilisée par les moteurs et équipements et réduire les pénalités sur les factures d'électricité.
- Optimisation du processus de fabrication en termes de gestion des matières premières, la réduction des déchets et l'optimisation de la chaîne de production.
- Captage et stockage du carbone (CSC) en installant de technologies de capture du CO₂ dans les cimenteries [22] par exemple Post-combustion (captage après combustion) qui capte le CO₂ à environ 70% dans les gaz de combustion en sortie de cheminée [34], cette technologie est techniquement possible mais nécessite des investissements.
- Réduction de la demande via l'éco-conception des bâtiments.

Gaz naturel

Tranche	Hypothèse	Réduction des émissions (%)
2022-2030	Optimisation du processus de fabrication	10
2031-2040	Substitution progressive des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs	20
2041-2050	Amélioration de l'efficacité énergétique	25

2.7 L'établissement du scénario atténuation

Le scénario d'atténuation vise à évaluer la trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur industriel en Algérie à l'horizon 2050. L'objectif est de simuler l'impact de mesures d'atténuation (efficacité énergétique, substitution de combustibles, technologies propres, etc.) sur les niveaux d'activité.

Pour cela, on utilise la formule suivante :

GrowthFromYear(2022, TCAM1, 2031, TCAM2, 2040, TCAM3)

pour tous les combustibles des sous-secteurs. C'est une extension de la fonction GrowthFromYear permettant de modéliser une croissance en plusieurs phases (croissance par tranche), avec des taux de croissance annuels moyens (TCAM) différents selon les périodes.

Cette méthode s'adapte parfaitement aux exigences de planification climatique à long terme, en particulier dans le contexte des pays en développement comme l'Algérie, où les transitions industrielles nécessitent des phases d'adaptation graduelles.

Pour la première tranche [2022-2030], on calcule les TCAM comme ceci :

$$\text{TCAM}_{\text{atténuation}} = \text{TCAM}_{\text{BAU}} \left(1 - \frac{\text{Réduction (\%)}}{100} \right) \quad (2)$$

Pour les autres tranches [2031-2040], [2041-2050], on prend le TCAM d'atténuation calculé avant:

$$\text{TCAM}_{\text{atténuation}} = \text{TCAM}_{\text{atténuation} - 1} \left(1 - \frac{\text{Réduction (\%)}}{100} \right) \quad (3)$$

Branch	Fuel	2022 TRA Scenario Value	Expression	Scale	Units
combust liq	Diesel	8640,2	GrowthFromYear(2022; 1,71%; 2031; 1,4535%; 2041; 1,1628%)		Terajoule
gaz naturel	Natural Gas	740695,1	GrowthFromYear(2022; 4,324%; 2031; 3,6754%; 2041; 2,94032%)		Terajoule

Figure 2.7: Etablissement du scénario de transition énergétique

Les résultats seront accessibles dans l'interface dédiée à l'affichage des résultats.

2.8 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons mis en place la démarche méthodologique adoptée pour modéliser les émissions de gaz à effet de serre des secteurs industriels, en particulier ceux liés à la production énergétique, à l'industrie manufacturière et de construction.

La structuration des données, le choix des paramètres d'entrée, ainsi que l'implémentation dans l'outil LEAP ont permis d'élaborer un modèle robuste, capable de simuler l'évolution des émissions dans différents contextes politiques et technologiques.

Cette modélisation constitue une base indispensable pour l'analyse prospective des trajectoires d'émissions selon deux scénarios : le scénario de référence (Business As Usual) et le scénario d'atténuation. Le passage au chapitre suivant permettra ainsi d'interpréter les résultats obtenus à partir du modèle, de comparer les dynamiques sectorielles entre les deux scénarios, et d'évaluer les effets attendus des politiques de réduction des GES dans l'horizon 2022–2050.

Chapitre 3

Résultats, analyses et interprétation des scénarios

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse comparative approfondie des résultats issus de la modélisation des émissions de gaz à effet de serre selon deux trajectoires contrastées : le scénario de référence, dit Business As Usual (BAU), et le scénario d'atténuation basé sur une transition énergétique progressive.

L'objectif principal est d'évaluer l'impact des mesures de réduction des émissions sur l'évolution future des rejets de GES, en tenant compte des dynamiques énergétiques et des politiques climatiques envisagées.

À travers l'exploitation des données issues du modèle LEAP, les tendances d'émissions sont examinées sur la période 2022–2050, mettant en lumière les différences structurelles et quantitatives entre les deux scénarios.

L'analyse met en évidence les implications environnementales à long terme, tout en soulignant l'importance des choix stratégiques en matière de planification énergétique durable.

Ce chapitre met en lumière les bénéfices qu'un scénario d'atténuation ambitieux pourrait apporter, en comparaison avec un scénario de référence, dans le contexte de la transition climatique.

3.2 Résultats des hypothèses du scénario de référence

En utilisant l'équation (1) du calcul des TCAM BAU, on aura les résultats suivants :

Tableau 3.1: Résultats de calcul des TCAM BAU par combustible et sous-secteur industriel

Sous-secteurs	Combustibles	TCAM BAU
Électricité et chaleur	Gaz naturel	4,7%
	Diesel	1,9%
Raffinage	Gaz naturel	0,7%
Production des combustibles solides	Gaz naturel	1,4%
Autres industries énergétiques	Gaz naturel	-1,5%
Industrie sidérurgique	Gaz naturel	12,3%
Industrie chimique	Gaz naturel	9,1%
	Combustibles liquides	8,3%
Industrie agroalimentaire	Gaz naturel	5,6%
	Combustibles liquides	18,8%
Industrie cimentière	Gaz naturel	4,4%
	Combustibles liquides	-13,3%

Le tableau 3.1, illustre l'analyse des données d'activité énergétique par sous-secteur industriel et type de combustible, selon la classification IPCC, met en évidence des dynamiques contrastées sur la période 2010–2022.

Le sous-secteur de la production d'électricité et de chaleur (1A1a) affiche une croissance notable de la consommation de gaz naturel avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 4,7 %, traduisant une orientation marquée vers cette source d'énergie, probablement en réponse à des considérations de disponibilité locale et de moindre intensité carbone par rapport aux combustibles liquides. À l'inverse, la consommation de diesel dans ce même sous-secteur évolue plus lentement 1,9 %, suggérant un usage résiduel.

Les raffineries (1A1b) et la production de combustibles solides (1A1c) enregistrent des croissances modérées ou faibles, voire une baisse dans le cas de certaines utilisations du gaz naturel -1,5 %, ce qui indique des évolutions structurelles ou technologiques dans ces activités.

Dans l'industrie sidérurgique (1A2a), une croissance remarquable de la consommation de

gaz naturel est observée avec un TCAM de 12,3 %, témoignant d'une forte expansion de ce secteur. Les valeurs initiales pour le diesel et le GPL étant non renseignées leur TCAM n'est pas calculable, bien que leurs volumes en 2022 soient significatifs.

L'industrie chimique (1A2c) présente une dynamique d'ensemble homogène avec une forte croissance de l'ensemble des combustibles (TCAM de 8,3 % pour le gaz naturel, diesel, GPL, kérosène et autres produits pétroliers), traduisant une intensification de l'activité énergétique dans ce sous-secteur.

De manière similaire, l'industrie agroalimentaire (1A2e), affiche une hausse importante de la consommation, notamment pour le LPG dont la croissance annuelle moyenne atteint 18,8 %, bien qu'à partir d'une base initiale très faible.

Enfin, l'industrie non métallique représentée par le sous-secteur cimentier (1A2f) se caractérisent par la consommation de gaz naturel qui progresse (TCAM de 4,4 %), et celle des combustibles liquides (diesel, GPL et autres produits pétroliers) chute fortement, avec un TCAM de -13,3 %, ce qui peut être interprété comme un effet combiné de substitution énergétique en faveur du gaz naturel, d'efficacité énergétique ou de réduction d'activité dans certains segments industriels. L'ensemble de ces évolutions illustre les changements structurels et technologiques du secteur industriel en Algérie, tout en soulignant la place croissante du gaz naturel dans le mix énergétique industrie.

3.3 Résultats des hypothèses du scénario de transition énergétique

Tableau 3.2: Résultat de calcul des TCAM Atténuation par combustible et sous-secteur industriel

Sous-secteur	Combustible	2022–2030	2031–2040	2041–2050
Électricité et chaleur	Gaz naturel	4,32%	3,67%	2,94%
	Diesel	1,71%	1,45%	1,16%
Raffinage	Gaz naturel	0,651%	0,57%	0,45%
Production des combustibles solides	Gaz naturel	1,316%	1,18%	1,006%
Autres industries énergétiques	Gaz naturel	-1,38%	-1,2%	-0,98%
Industrie sidérurgique	Gaz naturel	11,07%	9,41%	7,33%
Industrie chimique	Gaz naturel	8,19%	6,96%	5,22%
	Combustibles liquides	7,304%	6,20%	5,09%
Industrie agroalimentaire	Gaz naturel	5,26%	4,73%	4,026%
	Combustibles liquides	16,54%	14,06%	11,53%
Industrie cimentière	Gaz naturel	3,96%	3,168%	2,37%

Le tableau 3.2 présente les Taux de Croissance Annuel Moyen (TCAM) des émissions de GES pour chaque sous-secteur industriel, selon trois périodes :

- 2022–2030
- 2031–2040
- 2041–2050

Ces TCAM représentent l'évolution annuelle moyenne des émissions en intégrant les mesures d'atténuation, soit une croissance ralentie ou une baisse, selon les cas. Ces

résultats traduisent l'ambition progressive de réduction des émissions selon un scénario d'atténuation aligné sur les objectifs climatiques à long terme.

Dans le sous-secteur de la production d'électricité et de chaleur, les TCAM montrent une baisse graduelle des émissions, notamment pour le gaz naturel (de 4,32 % en 2022–2030 à 2,94 % en 2041–2050), traduisant une transition vers des technologies plus efficaces et potentiellement l'intégration accrue des énergies renouvelables. Le diesel suit une trajectoire similaire mais avec un potentiel de réduction moindre.

Le raffinage affiche des taux plus faibles, reflétant un potentiel de réduction limité dû à la nature rigide des procédés de transformation. Le gaz naturel y enregistre une baisse modérée de -0,651 % à -0,45 % sur la période.

La production de combustibles solides, les réductions sont modestes mais constantes, indiquant des améliorations progressives en efficacité énergétique.

Pour les autres industries énergétiques, leurs TCAM sont négatifs, ce qui signifie l'adoption des technologies bas carbone.

En revanche, des réductions significatives sont observées dans les industries sidérurgique et chimique, avec des TCAM élevés en début de période (11,07 % et 8,19 % respectivement entre 2022–2030), qui décroissent par la suite. Cela traduit des efforts d'atténuation initiaux importants, grâce à l'introduction de technologies plus propres et de procédés innovants comme l'utilisation d'hydrogène.

Dans l'industrie agroalimentaire, les réductions sont marquées, en particulier pour les combustibles liquides (jusqu'à 16,54 % sur la première tranche), ce qui reflète un potentiel important d'optimisation énergétique et de conversion vers des combustibles alternatifs.

Enfin, l'industrie cimentière présente également une dynamique de réduction continue (de 3,96 % à 2,37 %), cohérente avec les efforts potentiels de réduction via des nouvelles technologies et l'optimisation des procédés industrielles.

Globalement, les TCAM suivent une logique de décroissance par tranche temporelle, traduisant une courbe d'effort typique des scénarios d'atténuation. Ces résultats constituent une base solide pour la modélisation prospective et l'élaboration de politiques ciblées d'atténuation dans le secteur industriel algérien.

3.4 Résultats de modélisation

3.4.1 Résultats de modélisation du scénario de référence

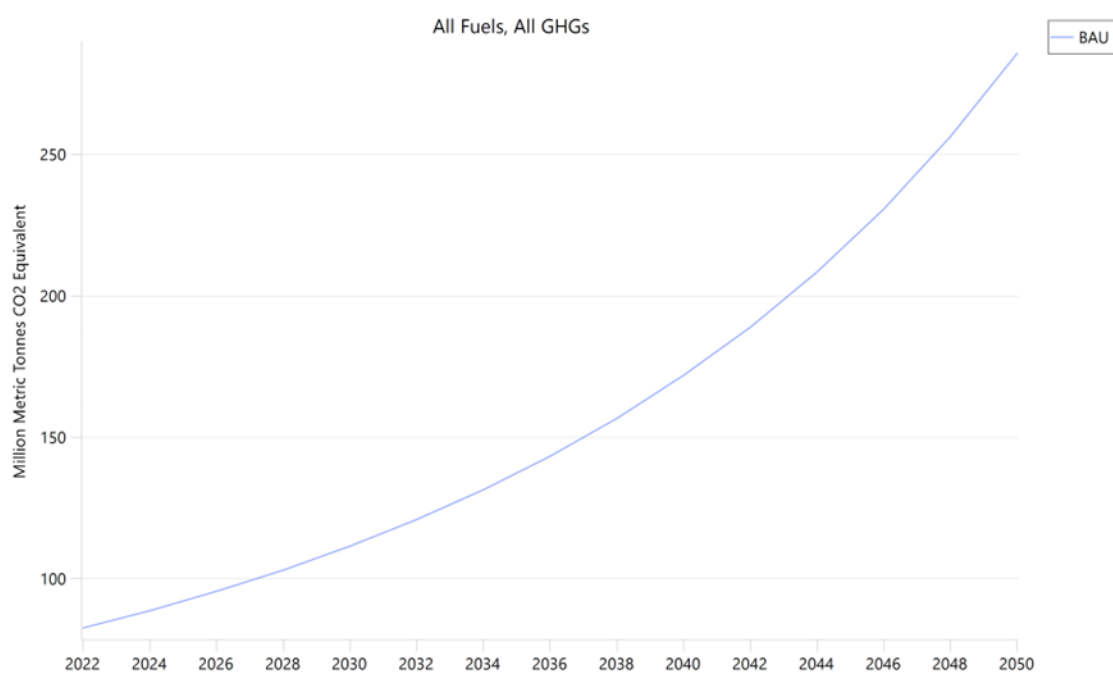


Figure 3.1: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux sous-secteurs pour le scénario de référence

Tableau 3.3: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux sous-secteurs pour le scénario de référence

Scenario	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
BAU	82,6	88,7	95,5	103,1	111,6	120,9	131,5	143,3	156,7	171,9	189,0	208,5	230,8	256,3	285,8	2 376,3
Total	82,6	88,7	95,5	103,1	111,6	120,9	131,5	143,3	156,7	171,9	189,0	208,5	230,8	256,3	285,8	2 376,3

La figure 3.1 et le tableau 3.3 présentent le résultat de modélisation des émissions des GES en MtCO₂eq des deux sous-secteurs, industrie liée aux activités énergétiques et industrie manufacturière et de construction pour le scénario de référence.

La courbe montre une croissance continue et accélérée des émissions GES sur les années projetées où les émissions passent de 82,6 MtCO₂eq en 2022 à 285,8 MtCO₂eq en 2050, soit une multiplication par presque 3 sur toute la période.

Cette progression suggère une augmentation constante de la consommation d'énergie dans les secteurs industriels, sans introduction de nouvelles politiques ou mesures climatiques après 2022.

Ce scénario illustre ce qui se passerait en l'absence d'interventions supplémentaires, autrement dit si les pratiques actuelles et les tendances économiques, démographiques et technologiques se poursuivaient sans changements. Il sert de référence pour comparer les impacts de scénarios d'atténuation.

Industrie liée aux activités énergétiques

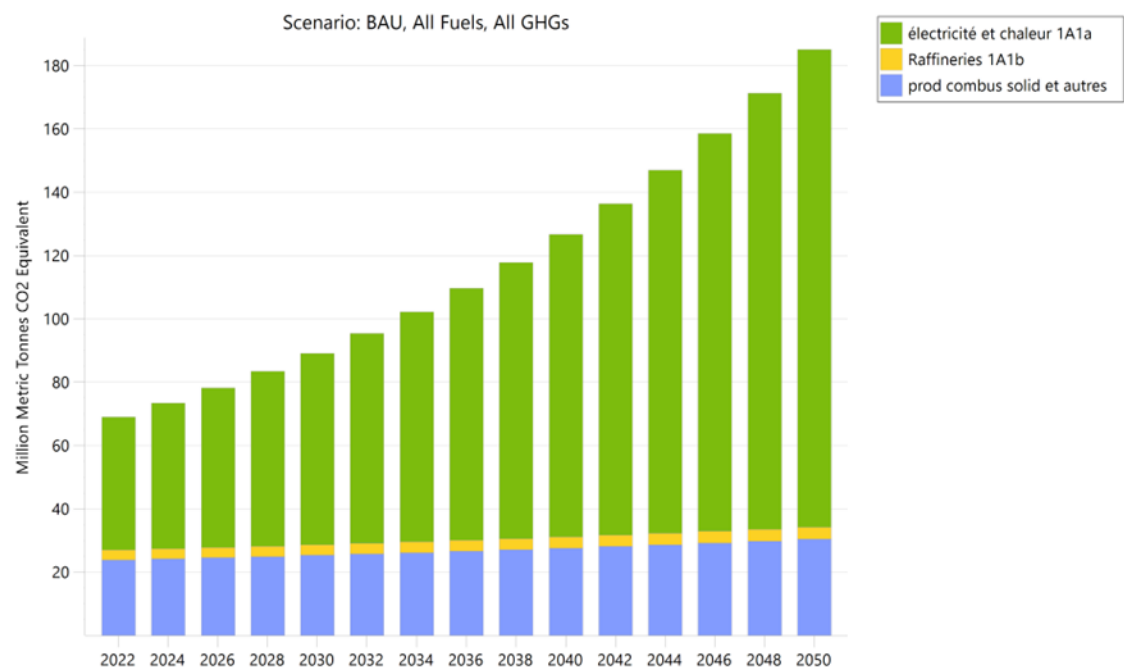


Figure 3.2: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie liée aux activités énergétiques (BAU)

Tableau 3.4: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie liée aux activités énergétiques (BAU)

Branch	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
électricité et chaleur 1A1a	42,0	46,1	50,4	55,3	60,5	66,3	72,7	79,6	87,2	95,6	104,7	114,7	125,7	137,7	150,9	1 289,5
Raffineries 1A1b	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	51,4
prod combus solid et autres	23,9	24,2	24,6	24,9	25,3	25,7	26,2	26,6	27,1	27,6	28,1	28,7	29,2	29,8	30,4	402,3
Total	69,0	73,4	78,2	83,4	89,1	95,4	102,2	109,6	117,8	126,7	136,4	147,0	158,6	171,3	185,1	1 743,1

La figure 3.2, et le tableau 3.4 montrent l’évolution des émissions de gaz à effet de serre, exprimées en MtCO₂eq, par branche d’industrie liée aux activités énergétiques entre 2022 et 2050 dans le scénario de référence BAU. Il en ressort que la branche production de chaleur et d’électricité (1A1a) constitue un contributeur majeur aux émissions, avec une croissance continue, qui passe de 42 MtCO₂eq en 2022 à 150,9 MtCO₂eq en 2050. La deuxième source principale est la catégorie combustibles solides et autres(1A1c), qui voit ses émissions croître rapidement pour atteindre environ 30,4 MtCO₂eq en 2050. En revanche, les émissions issues des raffineries (1A1b) restent marginales tout au long de la période, et passe de 3,1 MtCO₂eq en 2022 jusqu’au atteindre 3,8 MtCO₂eq en 2050. Cette répartition souligne la concentration des émissions sur deux branches principales,

suggérant une priorisation des efforts de décarbonation dans ces segments industriels.

Tableau 3.5: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)

GHG	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Carbon Dioxide	68,8	73,2	78,0	83,2	88,9	95,1	101,9	109,4	117,5	126,4	136,0	146,6	158,2	170,8	184,7	1 738,9
Methane (Combustion and Biogenic)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	3,3
Nitrous Oxide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0
Total	69,0	73,4	78,2	83,4	89,1	95,4	102,2	109,6	117,8	126,7	136,4	147,0	158,6	171,3	185,1	1 743,1

L'analyse du tableau 3.5 des émissions des GES par type de gaz dans l'industrie liée aux activités énergétiques met en évidence la domination du dioxyde de carbone (CO₂), qui représente la majorité des émissions du secteur, qui passe de 68,8 MtCO₂eq en 2022 à 184,7 MtCO₂eq en 2050, soit une augmentation de 168%, cela confirme la prévalence de processus de combustion d'énergie fossile dans l'industrie énergétique.

Le protoxyde d'azote (N₂O) reste quasi-négligeable et augmente très légèrement toute au long de la période avec des émissions stables de 0,1 MtCO₂eq à partir 2030.

Le méthane issu de la combustion et de la biodégradation dans ce sous-secteur, avec une augmentation de 2% sur l'ensemble de la période. Ces données confortent l'idée que toute stratégie de réduction des GES dans ce secteur devra se focaliser en priorité sur la réduction du CO₂ issu de la combustion d'énergies fossiles.

Tableau 3.6: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (BAU)

Fuel	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Natural Gas	68,4	72,7	77,5	82,7	88,4	94,6	101,4	108,8	116,9	125,8	135,5	146,0	157,6	170,2	184,0	1 730,7
Diesel	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	12,4
Total	69,0	73,4	78,2	83,4	89,1	95,4	102,2	109,6	117,8	126,7	136,4	147,0	158,6	171,3	185,1	1 743,1

L'analyse du tableau 3.6 des émissions des GES par type de combustibles dans l'industrie liée aux activités énergétiques illustre clairement la part prédominante du gaz naturel dans les émissions de GES du sous-secteur industriel.

Avec une trajectoire de croissance, le gaz naturel atteint environ 184 MtCO₂eq en 2050, il constitue ainsi la principale source de pollution climatique dans ce scénario.

Le diesel, bien qu'ayant une part nettement inférieure, contribue avec 83% d'émissions sur toute la période.

Ces résultats reflètent une forte dépendance au gaz naturel, dans une moindre mesure, aux combustibles liquides, et pointent vers un levier clair de décarbonation.

Industrie manufacturière et de construction

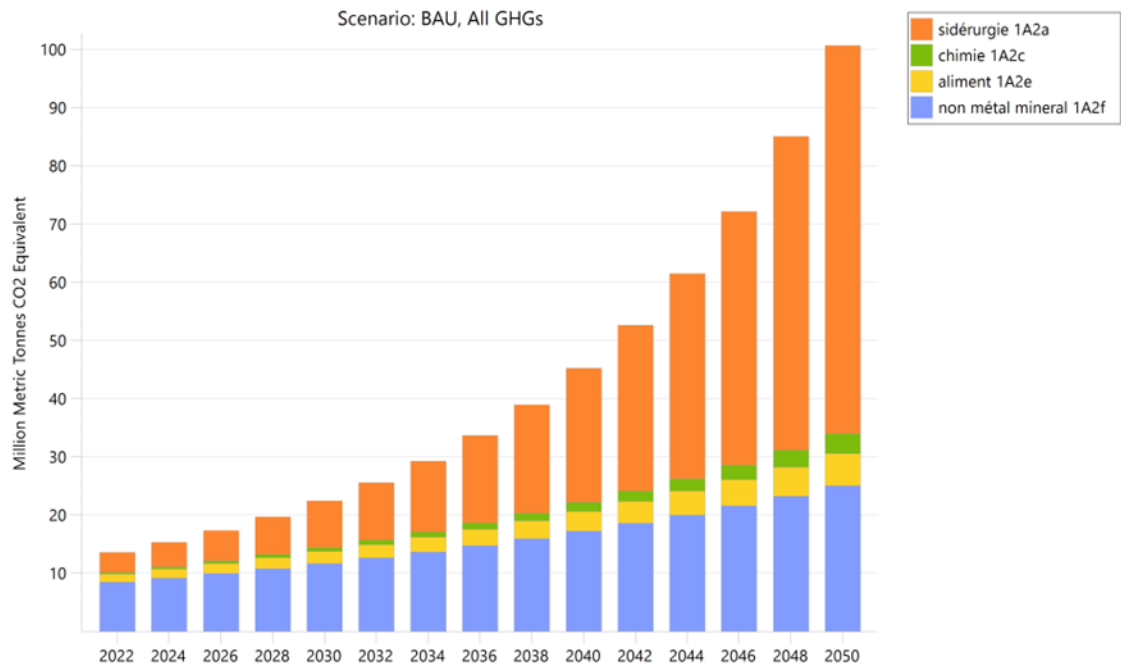


Figure 3.3: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie manufacturière et de construction (BAU)

Tableau 3.7: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie manufacturière et de construction (BAU)

Branch	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
sidérurgie 1A2a	3,4	4,2	5,2	6,4	8,0	9,9	12,2	15,1	18,6	23,1	28,5	35,3	43,6	53,9	66,7	334,0
chimie 1A2c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,5	2,9	3,4	20,9
aliment 1A2e	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,1	4,5	5,0	5,5	45,5
non métal mineral 1A2f	8,5	9,2	10,0	10,8	11,7	12,6	13,6	14,8	15,9	17,2	18,6	20,0	21,6	23,2	25,0	232,7
Total	13,6	15,3	17,3	19,7	22,4	25,6	29,3	33,7	39,0	45,3	52,6	61,5	72,2	85,1	100,7	633,1

La figure 3.3, et le tableau 3.7 représentent l’évolution des émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie manufacturière et de construction dans le scénario BAU.

Les branches les plus contributrices sont la sidérurgie (1A2a) avec un total cumulé qui passe de 3,4 MtCO₂eq en 2022 à 66,7 MtCO₂eq, suivie de non-métal minéral (1A2f) représentée par les cimentiers avec une augmentation de 194%.

La branche industrie chimique (1A2c) et agroalimentaire (1A2e) affichent des émissions plus modérées avec 3,4 MtCO₂eq, 5,5 MtCO₂eq en 2050 respectivement.

Cette dynamique traduit une forte dépendance des activités industrielles à haute intensité

énergétique, notamment dans les secteurs sidérurgique et cimentier, ce qui impose des priorités claires pour la décarbonation future du secteur.

Tableau 3.8: Les émissions des GES en MtCO₂eq par gaz dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)

GHG	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Carbon Dioxide	13,5	15,3	17,3	19,6	22,4	25,5	29,2	33,6	38,9	45,2	52,5	61,3	72,0	84,9	100,5	631,6
Methane (Combustion and Biogenic)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	1,2
Nitrous Oxide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4
Total	13,6	15,3	17,3	19,7	22,4	25,6	29,3	33,7	39,0	45,3	52,6	61,5	72,2	85,1	100,7	633,1

Le tableau 3.8 analyse les émissions de GES en MtCO₂eq par type de gaz dans l'industrie manufacturière et construction pour un scénario de référence.

Une domination remarquée du dioxyde de carbone (CO₂), avec 644% d'émission entre 2022 et 2050. Les autres gaz contribuent très faiblement : le méthane augmente faiblement avec 0,2 MtCO₂eq en 2050, et le protoxyde d'azote (N₂O) atteint seulement 0,1 MtCO₂eq dans la même année.

Cette structure des émissions reflète clairement l'origine des GES dans ce sous-secteur, principalement liée à la combustion de carburants fossiles. Cela confirme que les efforts de décarbonation doivent se concentrer sur la réduction des émissions de CO₂, en priorité via l'efficacité énergétique, l'électrification des procédés, et l'introduction de sources d'énergie bas-carbone.

Tableau 3.9: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (BAU)

Fuel	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Natural Gas	13,1	14,8	16,9	19,2	22,0	25,1	28,8	33,2	38,5	44,7	52,1	60,9	71,5	84,4	99,9	625,0
Kerosene	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7
Diesel	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	3,3
LPG	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	3,9
Oil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Total	13,6	15,3	17,3	19,7	22,4	25,6	29,3	33,7	39,0	45,3	52,6	61,5	72,2	85,1	100,7	633,1

Le tableau 3.9 représente les émissions des GES en MtCO₂eq par type de combustible dans l'industrie manufacturière et de construction, il précise les contributions des différents combustibles aux émissions de GES.

Le gaz naturel est la principale source, qui passe de 13,1 MtCO₂eq en 2022 à 99,9 MtCO₂eq en 2050. Il est suivi par le GPL qui émis environ 1% sur toute la période, et le diesel qui émis 0,5% de GES dans la même période.

Les autres sources comme le kérosène et l'huile ont une contribution marginale. Cette répartition énergétique révèle une forte dépendance aux combustibles fossiles, en particulier au gaz naturel, souvent perçu comme un "combustible de transition". Toutefois, pour assurer une réelle transition énergétique, il serait nécessaire d'intégrer davantage de sources renouvelables et de technologies sobres en carbone dans le mix énergétique du secteur manufacturier et de construction.

3.4.2 Résultats de modélisation du scénario de transition énergétique

Figure 3.4: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux sous-secteurs pour le scénario de transition énergétique

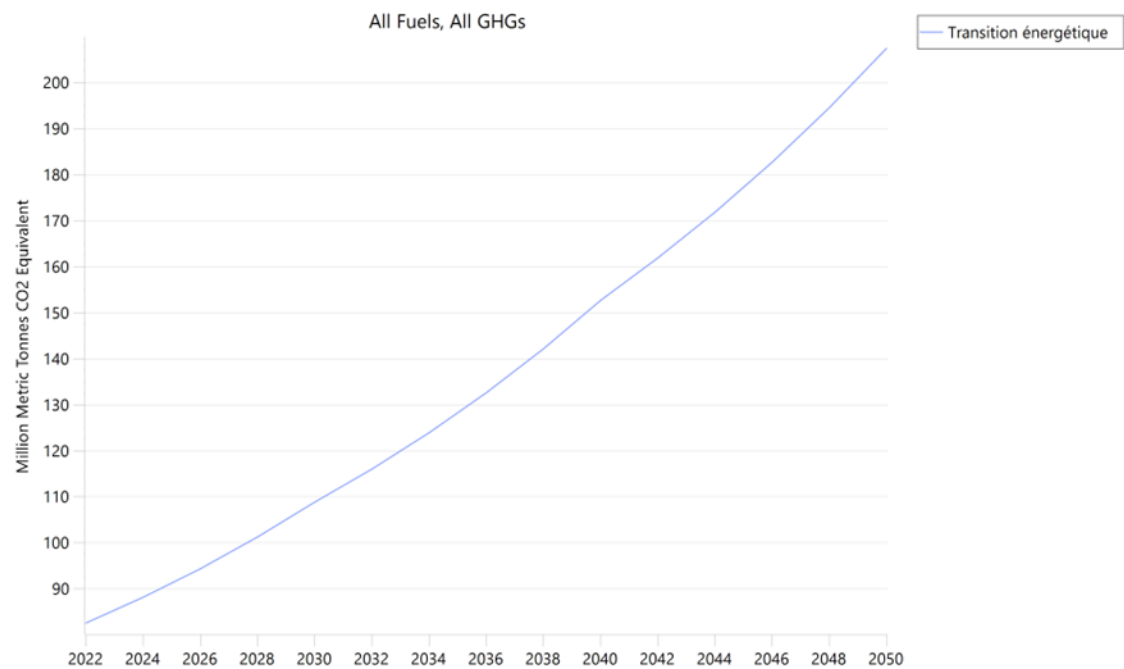


Tableau 3.10: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux sous-secteurs pour le scénario de transition énergétique

Scenario	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Transition énergétique	82,6	88,2	94,4	101,3	108,9	116,1	123,9	132,6	142,1	152,7	161,9	171,8	182,7	194,5	207,4	2 061,0
Total	82,6	88,2	94,4	101,3	108,9	116,1	123,9	132,6	142,1	152,7	161,9	171,8	182,7	194,5	207,4	2 061,0

Le scénario de transition énergétique présenté dans la figure 3.4 et le tableau 3.10 montre une évolution fortement croissante des émissions des GES dans les deux sous-secteurs industriels modélisés. Les émissions passent de 13,6 MtCO₂eq en 2022 à 62,4 MtCO₂eq en 2050, soit une multiplication par plus de 4,5 sur toute la période.

Cette trajectoire indique que, dans ce scénario, la demande énergétique continue d’augmenter rapidement, sous l’effet de la croissance économique, de l’industrialisation accrue et de l’urbanisation.

Ce scénario ne représente pas une réduction absolue des émissions, mais plutôt une

atténuation relative par rapport à un scénario BAU. Cette tendance souligne l’urgence de renforcer les politiques d’efficacité énergétique, de substitution des combustibles fossiles et d’intégration massive des énergies renouvelables.

Industrie liée aux activités énergétiques

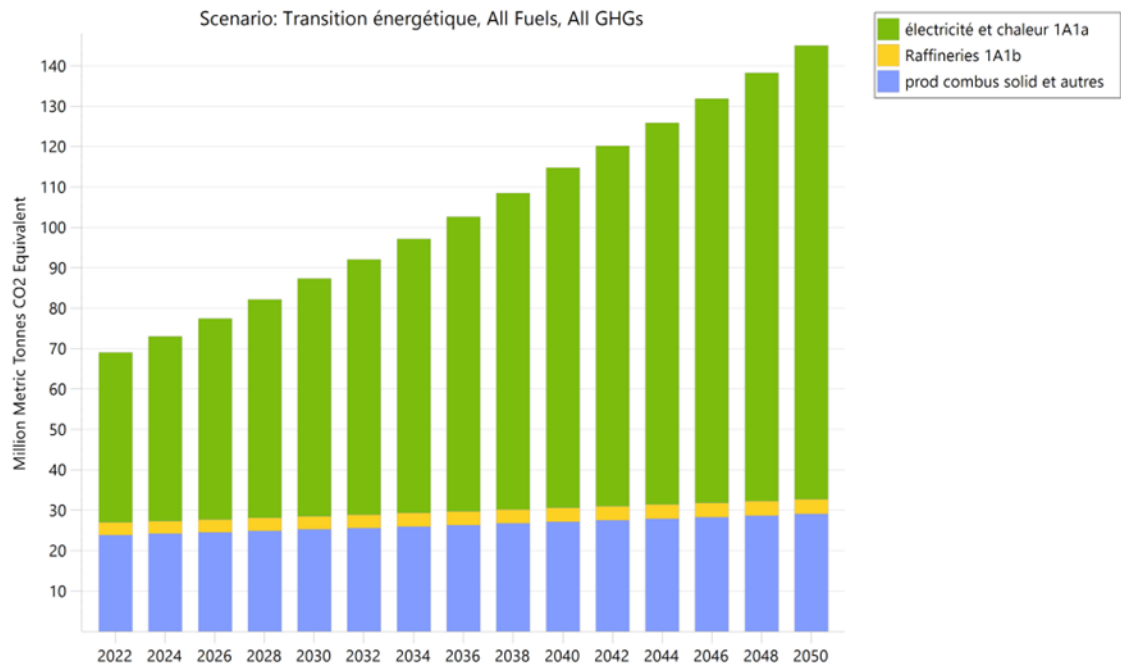


Figure 3.5: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)

Tableau 3.11: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d’industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)

Branch	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
électricité et chaleur 1A1a	42,0	45,7	49,7	54,1	58,8	63,2	67,9	72,9	78,4	84,2	89,2	94,5	100,1	106,0	112,3	1 119,2
Raffineries 1A1b	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6	50,6
prod combus solid et autres	23,9	24,2	24,5	24,9	25,2	25,6	26,0	26,3	26,7	27,1	27,5	27,9	28,3	28,7	29,1	395,8
Total	69,0	73,1	77,4	82,2	87,3	92,1	97,2	102,7	108,5	114,8	120,2	125,9	131,9	138,3	145,0	1 565,6

La figure 3.5 et le tableau 3.11, illustrent l’évolution des émissions des GES dans le sous-secteur de l’industrie liée aux activités énergétiques entre 2022 et 2050, selon un scénario de transition énergétique.

On observe une augmentation constante des émissions totales, passant d’environ 42 MtCO₂eq en 2022 à plus de 112 MtCO₂eq en 2050 , soit 167% de progression.

Cette croissance est principalement portée par la branche Électricité et chaleur (1A1a)

, dont la contribution augmente de façon marquée au fil du temps, ce qui indique une expansion soutenue de la demande énergétique.

Les émissions issues des Raffineries (1Ab) et de la Production de combustibles solides et autres restent relativement faibles et stables, représentant une part mineure dans le total. Cette tendance suggère que malgré les efforts de transition énergétique, la demande croissante en énergie, notamment en électricité, continue d'alimenter une hausse des émissions dans ce sous-secteur, suite à la demande continue de cette industrie.

Tableau 3.12: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)

GHG	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Carbon Dioxide	68,8	72,9	77,2	82,0	87,1	91,9	97,0	102,4	108,3	114,5	119,9	125,6	131,6	137,9	144,7	1 561,8
Methane (Combustion and Biogenic)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	2,9
Nitrous Oxide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9
Total	69,0	73,1	77,4	82,2	87,3	92,1	97,2	102,7	108,5	114,8	120,2	125,9	131,9	138,3	145,0	1 565,6

Le tableau 3.12 analyse les émissions de GES en MtCO₂eq par type de gaz dans l'industrie manufacturière et construction selon un scénario de transition énergétique.

Une domination remarquée du dioxyde de carbone (CO₂), avec environ 110% d'émission entre 2022 et 2050.

Les autres gaz contribuent très faiblement : le méthane augmente faiblement avec 0,3 MtCO₂eq en 2050, et le protoxyde d'azote atteint seulement 0,1 MtCO₂eq dans la même année. Cette structure des émissions reflète clairement l'origine des GES dans ce sous-secteur, on remarque très bien que le niveau des émissions est réduit par rapport au scénario BAU.

Alors, les efforts de décarbonation doivent concentrés sur la réduction des émissions de CO₂, ont un résultats significatif.

Tableau 3.13: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie liée aux activités énergétiques (transition énergétique)

Fuel	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Natural Gas	68,4	72,4	76,8	81,5	86,6	91,4	96,4	101,9	107,7	114,0	119,3	125,0	131,0	137,4	144,1	1 553,8
Diesel	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	11,8
Total	69,0	73,1	77,4	82,2	87,3	92,1	97,2	102,7	108,5	114,8	120,2	125,9	131,9	138,3	145,0	1 565,6

Le tableau 3.13 illustre les émissions de GES en MtCO₂eq par type de combustible utilisé dans le sous-secteur de l'industrie liée aux activités énergétiques.

Il en ressort que le gaz naturel est le principal contributeur aux émissions, avec une croissance de 68,4 MtCO₂eq en 2022 à 144,1 MtCO₂eq en 2050.

Le diesel représente une part marginale, avec des émissions très faibles inférieures à 1 MtCO₂eq tout au long de la période.

Cette dominance du gaz naturel traduit une dépendance persistante à cette source d'énergie, souvent considérée comme un combustible de transition, mais qui reste fortement émettrice à grande échelle. Cette dynamique pose un défi important pour la décarbonation du secteur, surtout en l'absence de mesures structurelles ambitieuses telles que le captage du carbone ou le basculement vers des sources renouvelables.

Industrie manufacturière et de construction

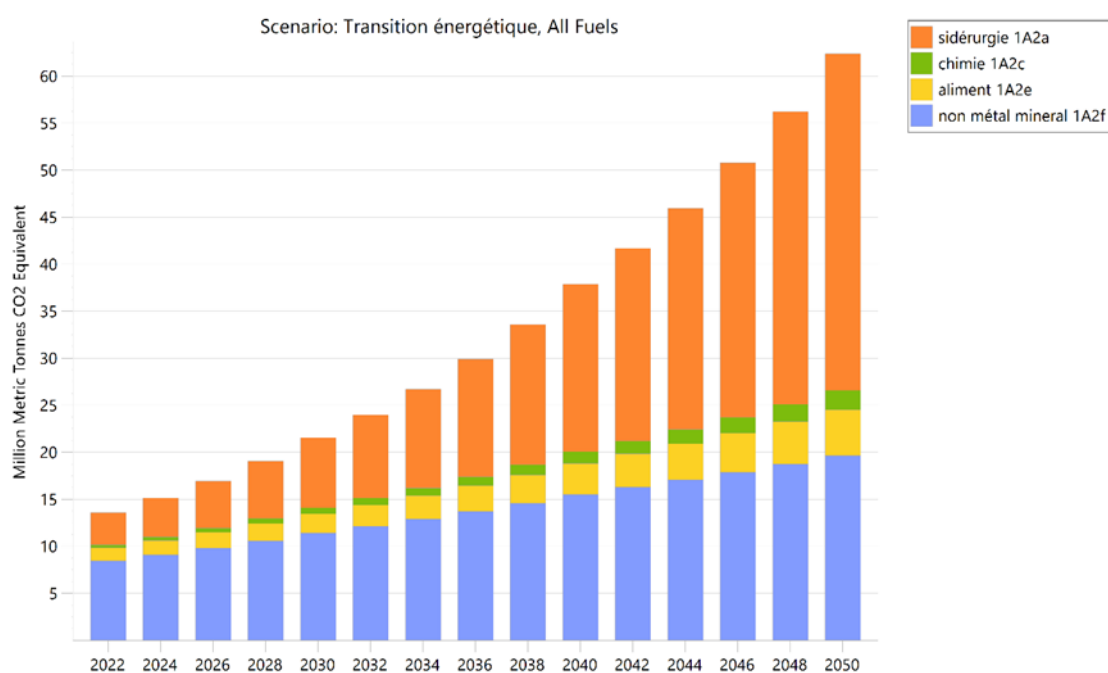


Figure 3.6: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)

Tableau 3.14: Les émissions des GES en MtCO₂eq par branches du sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)

Branch	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
sidérurgie 1A2a	3,4	4,1	5,0	6,1	7,4	8,8	10,5	12,5	14,9	17,8	20,5	23,5	27,1	31,1	35,8	228,7
chimie 1A2c	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	15,7
aliment 1A2e	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	4,2	4,5	4,9	43,2
non métal mineral 1A2f	8,5	9,1	9,8	10,6	11,4	12,1	12,9	13,7	14,6	15,5	16,3	17,1	17,9	18,7	19,6	207,8
Total	13,6	15,1	17,0	19,1	21,5	24,0	26,7	29,9	33,6	37,9	41,7	46,0	50,8	56,2	62,4	495,4

La figure 3.6 et le tableau 3.14, montrent la répartition des émissions de GES par branches industrielles dans le sous-secteur de l'industrie manufacturière et de la construction entre 2022 et 2050.

Les émissions totales passent de 13,6 MtCO₂eq en 2022 à 62,4 MtCO₂eq en 2050, traduisant une augmentation significative.

La sidérurgie (1A2a) est le principal contributeur, qui passe de 3,4 MtCO₂eq en 2022 à 35,8 MtCO₂eq en 2050, représentant près de la moitié des émissions totales du sous-secteur. Suivent les industries non métalliques minérales (1A2f), principalement le ciment, avec 19,6 MtCO₂eq en 2050.

Les secteurs de la chimie (1A2c) et de l'agroalimentaire (1A2e) contribuent nettement moins, bien que leurs émissions soient en croissance. Ces résultats confirment que les procédés industriels lourds comme la production d'acier et de ciment sont les principaux moteurs des émissions de GES dans ce sous-secteur, en raison de leur forte intensité énergétique et de leurs procédés thermochimiques émissifs malgré les efforts d'atténuation qui sont remarquables dans ce cas.

Tableau 3.15: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de gaz dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)

GHG	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Carbon Dioxide	13,5	15,1	16,9	19,0	21,5	23,9	26,7	29,8	33,5	37,8	41,6	45,8	50,7	56,1	62,3	494,2
Methane (Combustion and Biogenic)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9
Nitrous Oxide	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
Total	13,6	15,1	17,0	19,1	21,5	24,0	26,7	29,9	33,6	37,9	41,7	46,0	50,8	56,2	62,4	495,4

Le tableau 3.15 révèle que les émissions de GES dans le sous-secteur de l'industrie manufacturière et de la construction sont dues au dioxyde de carbone (CO₂), qui représente 62,3 MtCO₂eq d'ici 2050.

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote sont négligeables par rapport au CO₂.

Cela indique que les émissions sont principalement liées à la combustion de combustibles fossiles et aux procédés industriels libérant du CO₂, avec une quasi-absence de sources biologiques ou agricoles dans ce sous-secteur.

Cette structure simplifiée du profil d'émissions permet de cibler plus facilement les stratégies de réduction, qui ont un résultat significatif par rapport au BAU.

Tableau 3.16: Les émissions des GES en MtCO₂eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction (transition énergétique)

Fuel	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
Natural Gas	13,1	14,7	16,5	18,6	21,1	23,5	26,3	29,5	33,1	37,4	41,2	45,4	50,2	55,7	61,8	488,0
Kerosene	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
Diesel	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,2
LPG	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	3,5
Oil	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Total	13,6	15,1	17,0	19,1	21,5	24,0	26,7	29,9	33,6	37,9	41,7	46,0	50,8	56,2	62,4	495,4

Le tableau 3.16 représente les émissions des GES en MtCO₂eq par type de combustibles dans le sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction pour un scénario de transition énergétique, il confirme que le gaz naturel est la principale source de GES dans le sous-secteur manufacturier et de la construction, avec 61,8 MtCO₂eq en 2050, soit plus de 95 % des émissions.

Les autres combustibles, tels que le diesel, le kérosène, le GPL et l'huile, ont une contribution marginale. Cela reflète une forte dépendance au gaz naturel comme source d'énergie dans l'industrie algérienne, notamment pour les procédés à haute température comme le ciment, la sidérurgie.

Bien que le gaz naturel soit souvent considéré comme un combustible de transition, son utilisation à grande échelle reste incompatible avec une trajectoire de neutralité carbone. Ce profil souligne que les alternatives bas-carbone telles que l'électrification des procédés, l'hydrogène vert ou le captage du carbone dans ces secteurs clés ont pu réduire les émissions par rapport au scénario de référence.

3.4.3 Comparaison des scénarios de référence et de transition énergétique

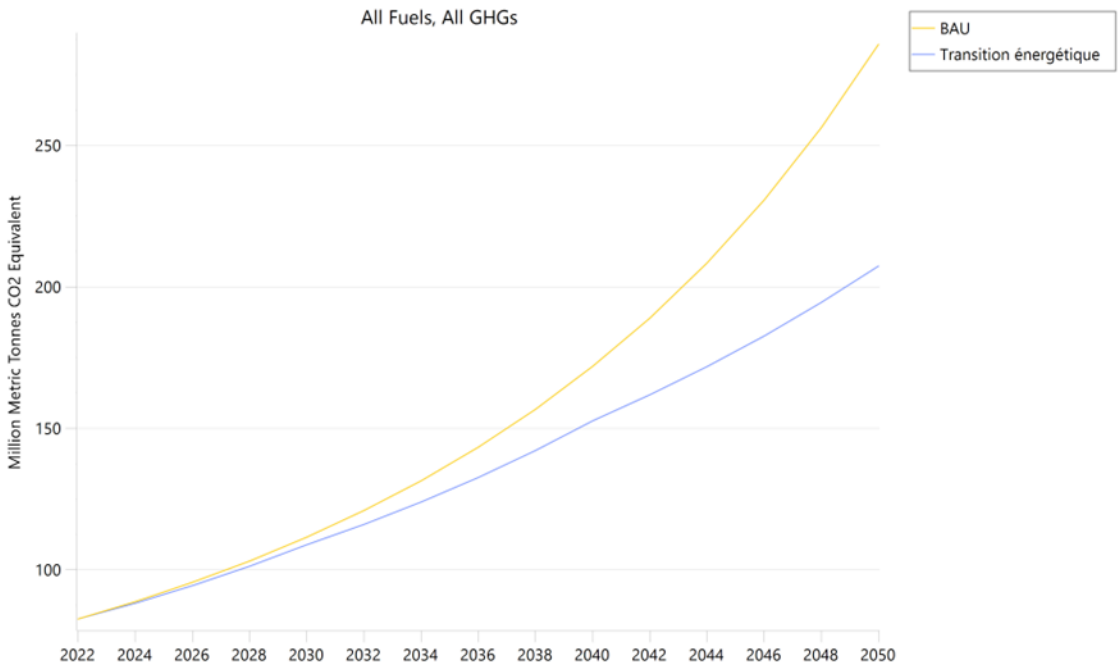


Figure 3.7: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios

Tableau 3.17: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios

Scenario	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
BAU	82,6	88,7	95,5	103,1	111,6	120,9	131,5	143,3	156,7	171,9	189,0	208,5	230,8	256,3	285,8	2 376,3
Transition énergétique	82,6	88,2	94,4	101,3	108,9	116,1	123,9	132,6	142,1	152,7	161,9	171,8	182,7	194,5	207,4	2 061,0
Total	165,2	176,9	189,9	204,3	220,4	237,0	255,4	275,9	298,9	324,6	350,9	380,3	413,5	450,9	493,2	4 437,2

La modélisation des émissions de gaz à effet de serre entre 2022 et 2050 selon deux scénarios Business As Usual (BAU) et Transition énergétique énergétique est représentée dans la figure 3.7 et le tableau 3.17, elle révèle des différences significatives en matière d’impact environnemental.

Dans le scénario BAU, qui suppose l’absence de politiques supplémentaires, les émissions augmentent fortement, atteignant 285,8 MtCO₂eq en 2050, à l’inverse, le scénario de transition énergétique, intégrant des mesures de décarbonation comme l’amélioration de l’efficacité énergétique et le recours accru aux énergies renouvelables, permet de limiter cette hausse, plafonnant à 207,4 MtCO₂eq en 2050, soit une réduction d’environ 27%.

Ces résultats illustrent clairement l’importance stratégique d’une transition énergétique

ambitieuse pour maîtriser les émissions de GES et atteindre les objectifs climatiques à long terme.

3.4.4 Comparaison des scénarios de référence et transition énergétique pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques

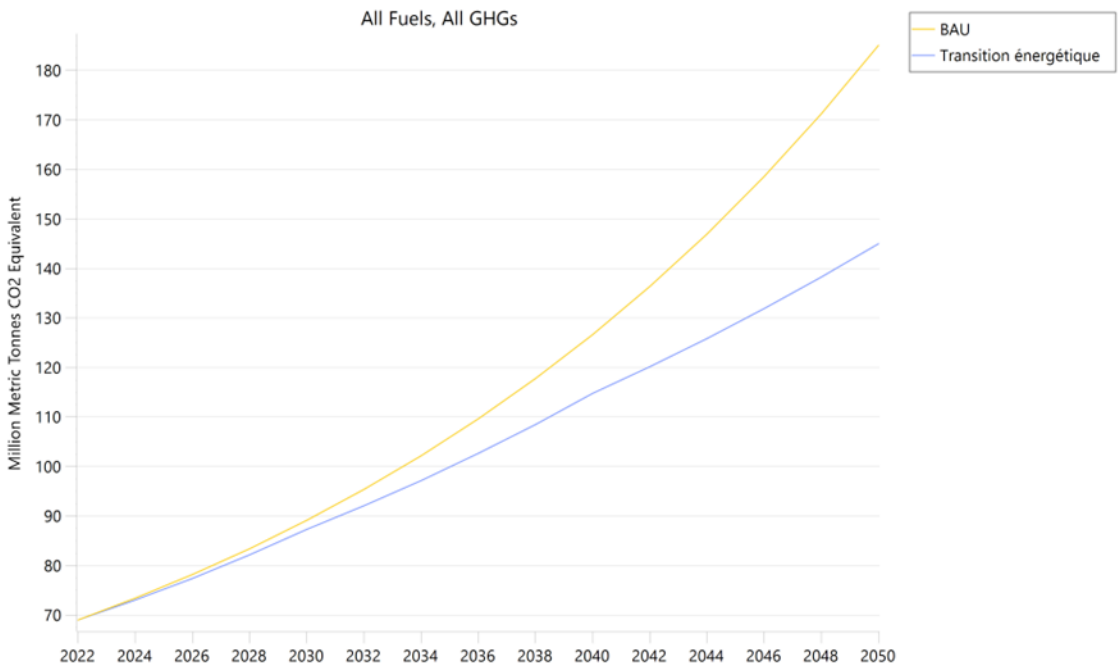


Figure 3.8: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques

Tableau 3.18: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios pour le sous-secteur lié aux activités énergétiques

Scenario	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
BAU	69,0	73,4	78,2	83,4	89,1	95,4	102,2	109,6	117,8	126,7	136,4	147,0	158,6	171,3	185,1	1 743,1
Transition énergétique	69,0	73,1	77,4	82,2	87,3	92,1	97,2	102,7	108,5	114,8	120,2	125,9	131,9	138,3	145,0	1 565,6
Total	138,0	146,5	155,6	165,6	176,5	187,5	199,4	212,3	226,3	241,5	256,6	272,9	290,5	309,5	330,1	3 308,7

Les résultats de la modélisation des émissions de gaz à effet de serre pour le sous-secteur des activités énergétiques, présentés dans la figure 3.8 et le tableau 3.18, permettent de comparer l'évolution des émissions selon deux scénarios : le scénario de référence et le scénario de transition énergétique.

En 2022, les émissions de GES dans les deux scénarios sont identiques, atteignant 69,0

MtCO₂eq, ce qui représente le point de départ commun. Mais à partir de cette année, une divergence progressive et significative est observée entre les deux trajectoires. Le scénario BAU projette une croissance continue et soutenue des émissions, atteignant 185,1 MtCO₂eq en 2050.

En revanche, le scénario de transition énergétique montre une évolution plus modérée des émissions, en raison de l'intégration de mesures d'efficacité énergétique, de substitution technologique et d'un recours accru aux énergies moins carbonées. Ainsi, les émissions atteignent 145 MtCO₂eq en 2050.

Cela représente une réduction près de 22 % par rapport au scénario BAU. Cette modélisation met donc en évidence l'efficacité des politiques d'atténuation appliquées dans le scénario de transition.

L'écart croissant entre les deux courbes à partir de 2030 indique que les effets des mesures prennent de l'ampleur à moyen et long terme. Cette tendance confirme l'intérêt stratégique d'investir dès aujourd'hui dans des solutions à faible intensité carbone pour le secteur énergétique, principal contributeur aux émissions nationales de GES.

3.4.5 Comparaison des scénarios de référence et de transition énergétique pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction

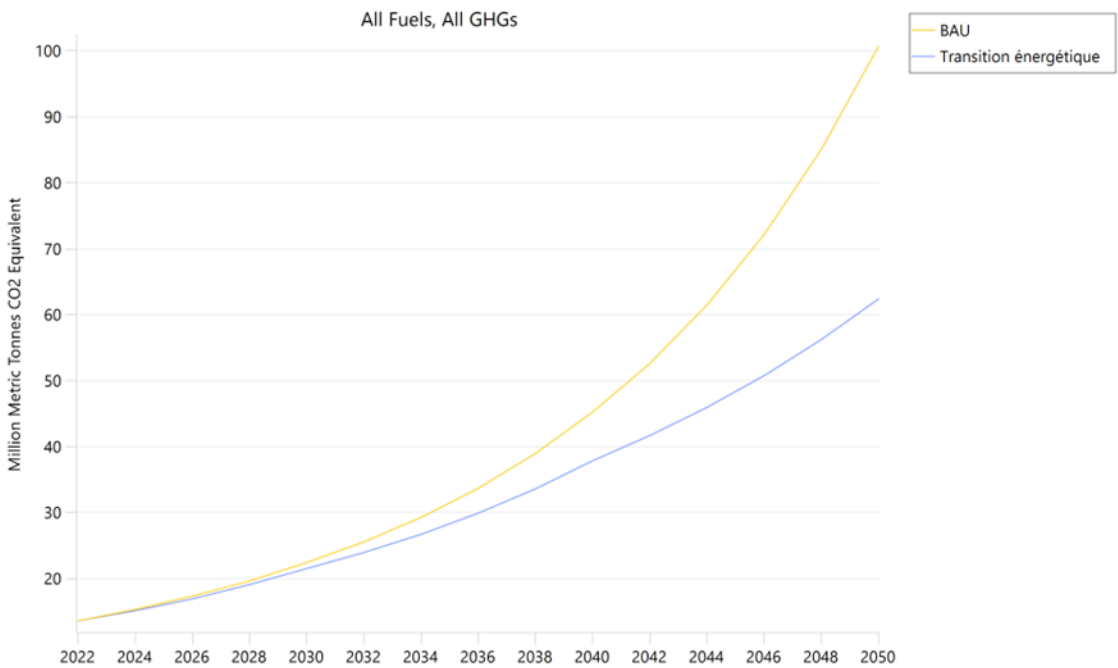


Figure 3.9: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction

Tableau 3.19: Les émissions de GES en MtCO₂eq des deux scénarios pour le sous-secteur industrie manufacturière et de construction

Scenario	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2036	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	Total
BAU	13,6	15,3	17,3	19,7	22,4	25,6	29,3	33,7	39,0	45,3	52,6	61,5	72,2	85,1	100,7	633,1
Transition énergétique	13,6	15,1	17,0	19,1	21,5	24,0	26,7	29,9	33,6	37,9	41,7	46,0	50,8	56,2	62,4	495,4
Total	27,1	30,4	34,3	38,7	44,0	49,5	56,0	63,6	72,6	83,1	94,3	107,5	123,0	141,3	163,1	1 128,5

Les résultats issus de la figure 3.9 et du tableau 3.19 présentent l'évolution projetée des émissions de gaz à effet de serre du sous-secteur de l'industrie manufacturière et de la construction selon deux scénarios : un scénario de référence et un scénario de transition énergétique. En 2022, les émissions sont quasiment similaires entre les deux scénarios, avec 13,6 MtCO₂eq pour le BAU et 13,6 MtCO₂eq pour le scénario de transition. À partir de cette année de référence, une divergence progressive est observée. Dans le scénario BAU, les émissions augmentent de manière continue pour atteindre 100,7 MtCO₂eq en 2050.

En revanche, le scénario de transition énergétique intègre des mesures d'atténuation telles que l'optimisation des procédés industriels, l'efficacité énergétique, l'utilisation de technologies propres et la réduction de la consommation des combustibles fossiles. Ces mesures permettent une croissance plus maîtrisée des émissions, avec 62,4 MtCO₂eq en 2050.

L'analyse comparative des deux trajectoires montre une réduction d'environ 38 % sur la période étudiée. Cela illustre clairement le potentiel d'atténuation que peut offrir une stratégie proactive de transition énergétique appliquée au sous-secteur d'industrie manufacturière et de construction.

Le graphique confirme que l'impact des mesures d'atténuation devient significatif à partir de 2030, avec un écart croissant entre les deux courbes, mettant en évidence l'importance des politiques industrielles durables et de l'innovation technologique pour maîtriser les émissions dans un secteur historiquement énergivore.

3.5 Conclusion

L'analyse comparative des scénarios BAU et de transition énergétique réalisée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les dynamiques de la demande énergétique et des émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs étudiés. Le scénario BAU, caractérisé par une continuité des tendances actuelles sans mise en œuvre de politiques supplémentaires, projette une augmentation significative de la consommation d'énergie et des émissions, notamment dans le secteur industriel.

En revanche, le scénario de transition énergétique, intégrant des mesures ciblées telles que l'amélioration de l'efficacité énergétique, la substitution des combustibles fossiles, et l'introduction de technologies plus propres, montre une réduction substantielle des émissions cumulées sur la période de modélisation.

Les résultats mettent en évidence l'efficacité des politiques d'atténuation, qui permettent non seulement de contenir la hausse des besoins énergétiques, mais surtout de réduire les émissions de manière significative, en contribuant à l'atteinte des objectifs climatiques nationaux et internationaux. Ces mesures s'avèrent particulièrement pertinentes dans les sous-secteurs à forte intensité carbone, où elles génèrent un impact environnemental positif tout en ouvrant la voie à une transition énergétique durable.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Face à l'urgence climatique mondiale et aux engagements internationaux, la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur industriel représente un levier stratégique pour l'Algérie. Ce mémoire a permis d'élaborer une modélisation à l'aide de l'outil LEAP, en évaluant deux trajectoires possibles : un scénario de référence (BAU) et un scénario de transition énergétique.

Les résultats obtenus montrent clairement que des actions ciblées, notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique, la substitution des combustibles, et l'intégration de technologies plus propres, peuvent significativement atténuer les émissions du secteur industriel à l'horizon 2050. Les secteurs les plus intensifs en carbone, comme la sidérurgie et la cimenterie, offrent les potentiels de réduction les plus importants.

Ce travail met en lumière la nécessité d'une planification énergétique intégrée, soutenue par des politiques publiques, des mécanismes de financement verts et un cadre réglementaire adapté. Il invite à poursuivre les efforts de modélisation et de suivi, en tenant compte des réalités économiques et technologiques nationales.

En définitive, la transition vers une industrie bas carbone en Algérie est non seulement une exigence environnementale, mais également une opportunité de modernisation industrielle et de compétitivité économique. Ce travail met en évidence le rôle clé que peut jouer la modélisation dans l'orientation des stratégies industrielles durables et la prise de décision climatique.

Au regard des résultats obtenus et des limites inhérentes à toute modélisation prospective, plusieurs axes de recherche peuvent utilement prolonger et approfondir les travaux menés dans ce projet.

Premièrement, l'intégration explicite de paramètres économiques – tels que les coûts d'investissement, les retours sur investissement attendus, ou encore les analyses de rentabilité des mesures proposées – renforcerait la robustesse et la crédibilité des trajectoires modélisées. L'ajout de ces éléments constituerait un pas important vers une évaluation plus réaliste de la faisabilité des politiques climatiques dans un contexte national marqué par des

contraintes budgétaires et technologiques.

Deuxièmes , une extension du périmètre de la modélisation aux interactions entre l'industrie énergétique et d'autres secteurs stratégiques (transports, agriculture, bâtiment, etc.) permettrait d'adopter une approche systémique. Une telle démarche faciliterait l'identification des synergies intersectorielles.

Troisièmement , une piste particulièrement prometteuse consisterait à conduire des études sectorielles approfondies (par exemple, sur la sidérurgie, la cimenterie, ou l'agroalimentaire), en articulant les actions d'atténuation aux politiques publiques déjà en place. Cela permettrait d'évaluer, de manière plus opérationnelle, l'efficacité concrète des mesures envisagées, et d'alimenter l'élaboration de feuilles de route sectorielles cohérentes et réalistes.

Ces perspectives invitent à poursuivre les efforts de recherche en croisant davantage disciplines, échelles et temporalités, pour renforcer la pertinence scientifique et l'utilité pratique des travaux en appui aux politiques climatiques national.

Bibliographie

- [1] IPCC, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Assessment Report 6, 28 février 2022.
- [2] Nations Unies, Les changements climatiques, Action Climat.
- [3] K. Xu, X. Wang, C. Jiang, et O. J. Sun, « Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity », Environmental Research, 2020.
- [4] H. Safa, Quelle Transition énergétique ? EDP Sciences, 2013.
- [5] SchoolMouv, <https://www.schoolmouv.fr/schemas-bilan/l-effet-de-serre/schema-bilan>
- [6] J.-C. Bernier et al., Chimie et Changement Climatique, EDP Sciences, 2016.
- [7] Académie des technologies, Le Méthane : D'où Vient-Il et Quel Est Son Impact Sur le Climat ? EDP Sciences, 2015.
- [8] GEO, « Gaz à effet de serre : qu'est-ce que le protoxyde d'azote ? », Effet de serre, 19 nov. 2018.
- [9] UNICEF, State of Global Air Report 2024.
- [10] D. Harris, Paris Climate Agreement, ABDO Publishing Company, 2018.
- [11] P. Lejouxa et N. Ortar, « Laboratoire d'Économie des Transports, École Nationale des Travaux Publics de l'État, France », 2014.
- [12] S. Lagrée, Les enjeux de la transition énergétique au Viêt Nam et en Asie du Sud-Est, École française d'Extrême-Orient (ÉFEO).
- [13] Ministère de l'Énergie, des Mines et des Énergies Renouvelables, 2023.
- [14] Service des données et études statistiques, Emission Database for Global Atmospheric Research, 2022, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/fr/livre>

- [15] Service des données et études statistiques, Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde, 2023.
- [16] Agence Internationale d’Energie, 2023, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/fr/livre>
- [17] CCNUCC, Premier Rapport Biennal de Transparence (BTR1) : Soumission au titre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et de l’Accord de Paris, déc. 2024.
- [18] The global carbon project’s fossil CO2 emissions dataset, Andrew, Robbie M et Peters, Glen P, 2022
- [19] H. Ben Amirouche, Rapport final : Projet Renforcement de la Gouvernance Climatique au service de la CPDN ClimGov GIZ, GIZ, déc. 2021.
- [20] Ministère de l’Environnement, Évaluation des émissions de gaz à effet de serre de l’Algérie 2019-2050, 2019.
- [21] C. G. Heaps, LEAP: The Low Emissions Analysis Platform, [Software Version: 2024.1.1.15], Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA, 2022. Disponible sur : <https://leap.sei.org>.
- [22] GIZ et ministère des Énergies et des Mines, Projet de stratégie d’atténuation des émissions des GES du secteur de l’énergie à l’horizon de 2050.
- [23] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, chapitre 1, Amit Garg, Kainou Kazunari, and Tinus Pulles, 2006.
- [24] The contribution of clean energy to stability, cooperation and shared prosperity in the Mediterranean region, Stefania Scarpino, 2021-2022.
- [25] Direct reduction of iron to facilitate net zero emissions in the steel industry: A review of research progress at different scale, Junhao Ling, Haitao Yang, Guocai Tian, Jiaxin Cheng, Xin Wang, Xiaohua Yu, 15 February 2024.
- [26] Sustainability performance of the steel industry 2004-2022, November 2023.
- [27] Sustainable feedstocks: Accelerating recarbonization in chemicals, October 26, 2023 | Article.
- [28] Decarbonizing the chemical industry, Wenke Bengtsson, Peter Crispeels, Simon Knapp, Ken Somers, Ulrich Weihe, and Thomas Weskamp, Avril 2023.

- [29] Une évaluation comparative du R404A et de l'ammoniac (R717) dans une configuration industrielle R. K. Dreepaul, D. Rughoo, K. Busawon, 27 novembre 2020.
- [30] Comparaison du cycle de vie des impacts énergétiques, environnementaux et économiques du charbon par rapport aux granulés de bois pour la production de chaleur en Chine, Wang Changbo, Chan Yuan, Zhang Lixiao, Pang Mingyue, HaoYan, publié le 1 février 2017.
- [31] Biométhane et climat : font-ils bon ménage?, Alexandre Joly, Stéphane Amant, Cyril Cassagnaud, août 2021.
- [32] https://www.cementequipment.org/home/cement-kiln-thermal-efficiency-strategies-for-cost-savings-and-environmental-impact/google__vignette
- [33] WASTE HEAT RECOVERY POWER PLANTS IN CEMENT INDUSTRY, S K Gupta / S K Kaul Holtec Consulting Private Ltd., Gurgaon, India.
- [34] [https://www.capturemap.no/carbon-capture-cement industry/](https://www.capturemap.no/carbon-capture-cement-industry/)